



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

MODEL ZÁTĚŽE

LOAD MODEL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Matej Lašo

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marek Kopiczka

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
TECHNICKÉ A KOMUNIKAČNÍCH
V BRNĚ TECHNOLOGIÍ

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**
Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Matej Lašo

ID: 134350

Ročník: 2

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Model zátěže

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Studium problematiky přístupu k modelování v oblasti elektroenergetiky.
2. Definice zvoleného přístupu k modelování zátěže.
3. Tvorba modelu zátěže v programu PSCAD a jeho popis.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 20.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Marek Kapička

Konzultant diplomové práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

LAŠO, M. *Model zátěže*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 56 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marek Kopička.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....

Pod'akovanie:

Rád by som poďakoval svojmu vedúcemu diplomovej práce Ing. Marekovi Kopičkovi za jeho odborné vedenie a užitočné rady. Ďalej by som sa chcel hlavne poďakovať mojim rodičom a bratovi za neustálu podporu počas celého štúdia.

ABSTRAKT

Diplomová práca sa zoberá problematikou kvality elektrickej energie a modelovania záťaže. V práci je popísaná a vysvetlená problematika kvality elektrickej energie, princípu tvorenia modelu záťaže a jednotlivé typy záťaží a ich princípy. Ďalej sú popísané rôzne programy a ich hlavné výhody pri modelovaní v elektroenergetike, na záver sú vytvorené a popísané rôzne modely záťaží a ich simulácie v programe PSCAD.

KLÍČOVÁ SLOVA: kvalita elektrickej energie, modelovanie, elektroenergetika, PSCAD, model záťaže, záťaž

ABSTRACT

This thesis deals with power quality and load modeling. The issues of power quality, principles of load model creation and various types of loads and their principles are described and explained in this thesis. Various software and its main advantages in power systems modeling are described and various load models and simulations in PSCAD program are created and described at last.

KEY WORDS: power quality, modeling, power engineering, PSCAD, load model, load

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	11
ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK.....	12
1 ÚVOD	13
2 ELEKTRICKÁ ZÁŤAŽ A JEJ ROZDELENIE	14
2.1 LINEÁRNA ZÁŤAŽ	14
2.1.1 ODPOROVÁ ZÁŤAŽ	14
2.1.2 KAPACITNÁ ZÁŤAŽ	15
2.1.3 INDUKČNÁ ZÁŤAŽ	15
2.1.4 KOMBINÁCIA ZÁŤAŽÍ	15
2.2 NELINEÁRNA ZÁŤAŽ	17
2.2.1 NELINEÁRNE ZÁŤAŽE A ZDROJE	17
3 KVALITA ELEKTRICKEJ ENERGIE	19
3.1 FREKVENCIA	20
3.2 NAPÄTIE.....	21
3.2.1 ÚBYTOK NAPÄTIA	21
3.2.2 POKLES NAPÄTIA A PREPÄTIE	22
3.2.3 PREPÄTIE.....	22
3.2.4 PÔVODY POKLESU NAPÄTIA A PREPÄTIA	23
3.2.5 PORUCHY A ICH PÔSOBNIE NA SPOTREBITEĽSKÚ SIETĚ	24
3.2.6 KRÁTKODOBÉ POKLESY A PRERUŠENIE NAPÄTIA:.....	24
3.3 FLIKR	25
3.3.1 DEFINÍCIA RÝCHLEJ ZMENY NAPÄTIA – FLIKR.....	25
3.4 NESYMETRIA NAPÁJACIEHO NAPÄTIA	28
3.4.1 ZDROJE NESYMETRIE NAPÄTIA	28
3.4.2 ÚČINKY NESYMETRIE NAPÄTIA	28
3.5 HARMONICKÉ.....	29
3.5.1 HARMONICKÉ NAPÄTIE A PRÚD	30
4 MODELOVANIE ZÁŤAŽE	32
4.1 FYZIKÁLNE MODEL Y VS. BLACK BOX MODEL Y	32
4.1.1 ÚDAJE PRE MODELOVANIE ZÁŤAŽE	32
4.2 SWITCHING MODELS (SPÍNACIE MODEL Y)	33
4.3 AVERAGE MODELS (PRIEMERNÉ MODEL Y)	33
4.3.1 AVERAGE MODELOVANIE	33
4.4 STATICKÉ MODEL Y ZÁŤAŽE	34
4.4.1 ZÁŤAŽE S KONŠTANTNOU IMPEDANCI O U	34
4.4.2 ZÁŤAŽ S KONŠTANTNÝM PRÚDOM	34
4.4.3 ZÁŤAŽ S KONŠTANTNÝM VÝKONOM	34
4.4.4 EXPONENCIÁLNY MODEL ZÁŤAŽE	34

4.5 TYPY ZÁŤAŽÍ	35
4.5.1 KOMPOZÍCIA ZÁŤAŽÍ.....	35
5 MODELOVANIE A MOŽNOSTI POČÍTAČOVEJ SIMULÁCIE V ELEKTROENERGETIKE	36
5.1 20-SIM, UNIVERSITY OF TWENTE	36
5.2 ATP-EMTP, EMT-ATP USERS GROUP	37
5.3 DYMOLA – DYNAMIC MODELING LABORATORY, DYNASIM AB, LUND.....	38
5.4 DYNAST – DYNAMIC AND STATIC PROBLEMS, ICOSYM.....	39
5.5 MULTISIM 7, ELEKTRONIC WORK BENCH	40
5.6 THE SPICE.....	41
5.7 PSCAD.....	41
6 MODEL Y ZÁŤAŽÍ V PROGRAME PSCAD.....	43
6.1 MODEL Y ZÁŤAŽÍ SO ŠEŠŤPULZNÝM USMERŇOVAČOM.....	43
6.1.1 JEDNOSMERNÁ ODPOROVÁ ZÁŤAŽ.....	43
6.1.2 STRIEDAVÁ ZÁŤAŽ SO ŠEŠŤPULZNÝM USMERŇOVAČOM.....	45
6.1.3 ZÁŤAŽ S DVANÁSŤ PULZNÝM USMERŇOVAČOM	49
6.2 MODEL Y PRE NESYMETRIU	51
7 ZÁVER.....	54
POUŽITÁ LITERATÚRA	55

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázok 1: Priebek napätia a prúdu pri odporovej záťaži[2]	14
Obrázok 2: Priebek napätia a prúdu pri kapacitnej záťaži[2]	15
Obrázok 3: Priebek napätia a prúdu indukčnej záťaži[2]	15
Obrázok 4: Priebek napätí a prúdov pri kombinovanej záťaži[2]	16
Obrázok 5: V-A charakteristika linearnej záťaže.....	16
Obrázok 6: V-A charakteristika nelineárnej záťaže[12]	17
Obrázok 7: Zobrazenie priebehov rôznych druhov nelineárnych záťaží[12]	18
Obrázok 8: Zobrazenie priebehov napätí a prúdov od napájacieho zdroja po nelineárnu záťaž[12]	19
Obrázok 9: Perióda sínusového napätia[5]	20
Obrázok 10: Pokles napätia pod 1% menovitej hodnoty - prerušenie napätia[9]	22
Obrázok 11: Priebek dočasného prepätia ktoré trvá čas t_1 [4]	23
Obrázok 12: Znázornenie poklesu a prerušenie napätia	25
Obrázok 13: Jednofázový náhradný obvod napájacej siete[9]	26
Obrázok 14: Zmena svetelného toku žiarovky spôsobená zmenou napätia[6]	26
Obrázok 15: Spektrum napätia napájacej siete; v grafe vpravo je potlačená zložka 50 Hz[6]	27
Obrázok 16: Grafické zobrazenie symetrických zložiek[7]	28
Obrázok 17: Základná harmonická, tretia a piata harmonická[9]	29
Obrázok 18: Deformovaný časový priebeh prúdu[9]	30
Obrázok 19: Ukážka programu 20-SIM, prevzaté z [18]	37
Obrázok 20: Ukážka programu ATP Draw, prebrané z [19]	38
Obrázok 21: Ukážka programu DYMOLA, prebrané z [20]	39
Obrázok 22: Ukážka programu DYNAST, prevzaté z [19]	40
Obrázok 23: Ukážka programu MULTISIM, prebrané z [20]	40
Obrázok 24: Ukážka programu PSpice, prebrané z [22]	41
Obrázok 25: Ukážka programu PSCAD, zdroj vlastný	42
Obrázok 26: Hrubá schéma modelu záťaže	43
Obrázok 27: Jednosmerný model odporovej záťaže	43
Obrázok 28: Voľba parametrov pre model odporovej záťaže	44
Obrázok 29: Harmonické skreslenie prúdu a napätie, výkon záťaže	44
Obrázok 30: Priebek prúdov v elektrickej sieti pred vstupom do záťaže	45
Obrázok 31: Priebehy efektívneho prúdu a napätia na záťaži	45

<i>Obrázok 32: Zapojenie striedavej záťaže RL</i>	<i>46</i>
<i>Obrázok 33: Kontrol panel pre pripájanie a odpájanie záťaží.....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázok 34: Voľba parametrov pre striedavú záťaž.....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázok 35: Výpočet parametrov záťaže</i>	<i>47</i>
<i>Obrázok 36: Harmonické skreslenie prúdu a napätia v elektrickej sieti</i>	<i>47</i>
<i>Obrázok 37: Priebeh prúdov v elektrickej sieti.....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázok 38: Priebeh napätí v elektrickej sieti</i>	<i>48</i>
<i>Obrázok 39: Harmonické skreslenie prúdu v sieti pri 22 kV</i>	<i>48</i>
<i>Obrázok 40: Priebeh prúdu v sieti 22 kV</i>	<i>48</i>
<i>Obrázok 41: Zapojenie odporovej záťaže s dvanásť-pulzným usmerňovačom</i>	<i>49</i>
<i>Obrázok 42: Harmonické skreslenie prúdu a napätia vo všetkých fázach.....</i>	<i>49</i>
<i>Obrázok 43: Priebeh prúdu v elektrickej sieti vo všetkých fázach.....</i>	<i>50</i>
<i>Obrázok 44: zapojenie striedavej záťaže so dvanásť-pulzným usmerňovačom</i>	<i>50</i>
<i>Obrázok 45: Priebeh prúdu v elektrickej sieti.....</i>	<i>50</i>
<i>Obrázok 46: Harmonické skreslenie napätia a prúdu v sieti</i>	<i>51</i>
<i>Obrázok 47: Priebeh napätia pri šesť pulznom usmerňovači</i>	<i>51</i>
<i>Obrázok 48: Priebeh napätia pri dvanásť pulznom usmerňovači.....</i>	<i>52</i>
<i>Obrázok 49: Priebeh napätia a prúdu pri nesymetrii</i>	<i>52</i>
<i>Obrázok 50: Deformácia prúdu pri nesymetrii.....</i>	<i>53</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabuľka 1: Hodnoty harmonických napätí podľa normy [10]</i>	<i>31</i>
<i>Tabuľka 2: Hodnoty koeficientov a, b pre rôzne typy záťaží [26]</i>	<i>35</i>

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Symbol	názov	jednotka
T	perióda	s
f	frekvencia	Hz
p	počet pólových dvojíc	-
n	otáčky	ot/min
U_n	menovité napätie	V
ΔU	úbytok napätia	V
R_s	odpor	Ω
X_s	reaktancia	Ω
I	prúd	A
I_c	činný prúd	A
I_j	jalový prúd	A
Z	impedancia	Ω
E	napätie	V
P	činný výkon	W
Q	jalový výkon	VAr
P_{lt}	vnem flikru	-
THD	celkové harmonické skreslenie	-

Ostatné skratky a symboly sú vysvetlené priamo v texte

1 ÚVOD

Elektrickú energiu získavame premenou prírodných druhou energie, ako tepelné, chemické, mechanické a ďalšie. Aby sa vyrobená energia mohla čo najlepšie vyrobiť a spotrebovať, musí elektrická energia splňovať určité kritéria a požiadavky. Odoberatelia odoberajú elektrickú energiu od dodávateľa s predom dohodnutými parametrami a rôznymi charakteristikami, hovoríme teda o kvalite elektrickej energie. Elektrická energia je ďalej dodávaná do rôznych spotrebičov, ktoré sa rýchlo vyvíjajú a menia svoju štruktúru, teda nastávajú zmeny vo verejnej spotrebe, odvetí priemyslu. Tieto zmeny majú vplyv na kvalitu elektrickej energie. Elektrická energia, ktorá je dodávaná spotrebiteľom, je charakterizovaná rôznymi charakteristikami ktoré sú premenné a môžu mať vplyv na jej kvalitu. Je žiadúce, aby napájacie striedavé napätie malo konštantný kmitočet, sínusový priebeh s konštantnou amplitúdou. Existuje mnoho faktorov ktoré môžu, alebo spôsobujú odchýlky charakteristík. Z ekonomického hľadiska je v záujme odoberateľa, aby dodávaná elektrická energia menila svoje charakteristika na základe očakávaných možností, ako je napríklad stupeň súčasnosti odberu rôznych spotrebičov alebo rôznych odoberateľov.

Za posledné roky záujem v modelovaní záťaže narastal a tento záujem vytvoril novú oblasť pre výskum chovania napájacej sústavy pri rôznych záťažach. Niekoľko štúdií ukázalo kritický vplyv záťaží na stabilitu napätia a preto je potrebné nájdenie presnejších modelov záťaže. Aj keď záťaže elektrizačnej sústavy získali väčšiu pozornosť v posledných rokoch, sú stále považované za problematické vytvorenie modelu vzhľadom k veľkému počtu rôznych záťaží, pri zmene zaťaženia počas dňa, pri zmenách počasia a rôznych ročných období a pre nedostatok presných informácií o zložení záťaže [25].

2 ELEKTRICKÁ ZÁŤAŽ A JEJ ROZDELENIE

Elektrická záťaž je elektrická časť alebo súčasť daného obvodu, ktorý spotrebúva elektrickú energiu, teda môžeme povedať, že elektrická záťaž je opak elektrického zdroja ako sú napríklad batérie alebo generátor. V elektrických obvodoch sú príkladom záťaže napríklad elektrický spotrebič, osvetlenie, alebo iné zariadenie ktoré v obvode mení elektrickú energiu na svetlo, teplo alebo na mechanickú prácu. [1]

Elektrickú záťaž môžeme rozdeliť:

- Lineárna záťaž
- Nelineárna záťaž.

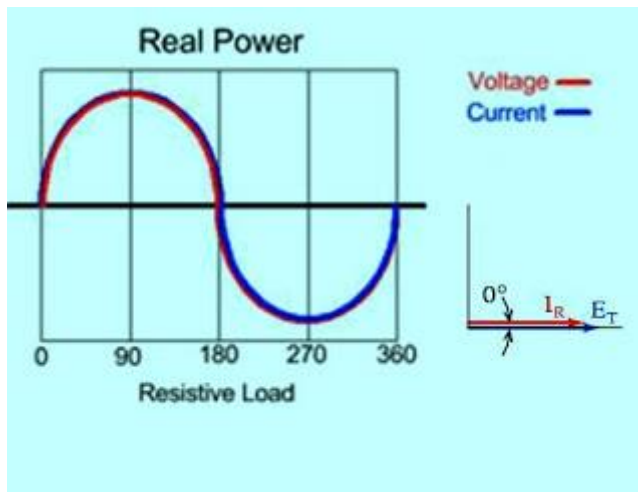
2.1 Lineárna záťaž

Lineárna elektrická záťaž, je záťaž kde priebehy napätia a prúdu sú sínusového charakteru. Patria sem záťaže:

- Odporová záťaž
- Kapacitná záťaž
- Induktívna záťaž
- Kombinácia predošlých troch záťaží

2.1.1 Odporová záťaž

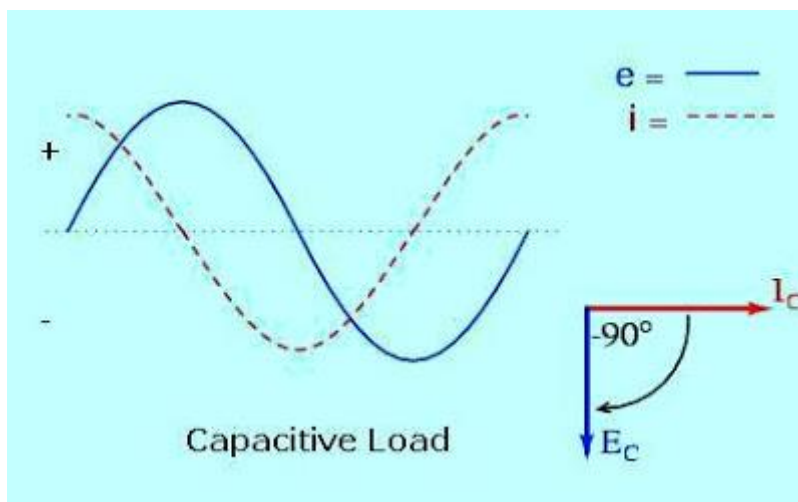
Odporová elektrická záťaž znižuje tok elektrického prúdu tým, že časť energie zmení na tepelnú energiu. Napätie a prúd sú vo fáze (obrázok 1).



Obrázok 1: Priebeh napätia a prúdu pri odporovej záťaži [2]

2.1.2 Kapacitná zát'az

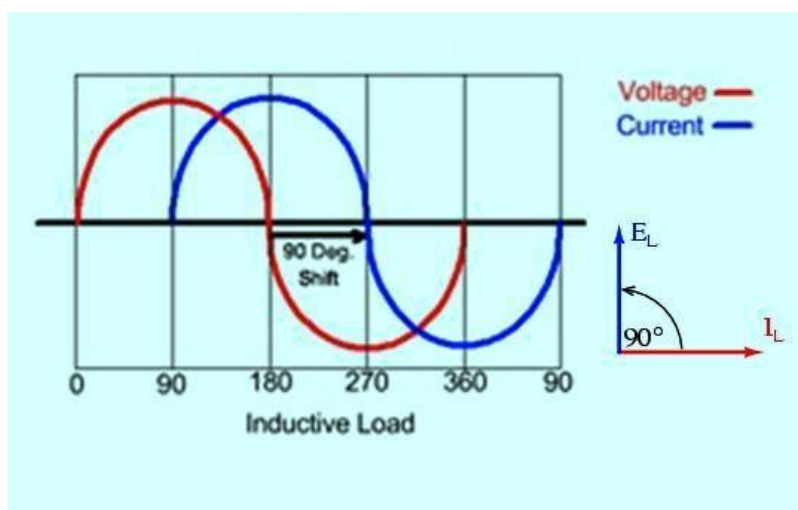
Kapacitná zát'az je zát'az, kde prúd predbieha napätie o 90° (obrázok 2). Využitie býva v rôznych elektrických obvodov ako napríklad napájacie zdroje, elektromotory.



Obrázok 2: Priebeh napätia a prúdu pri kapacitnej zát'aži[2]

2.1.3 Indukčná zát'az

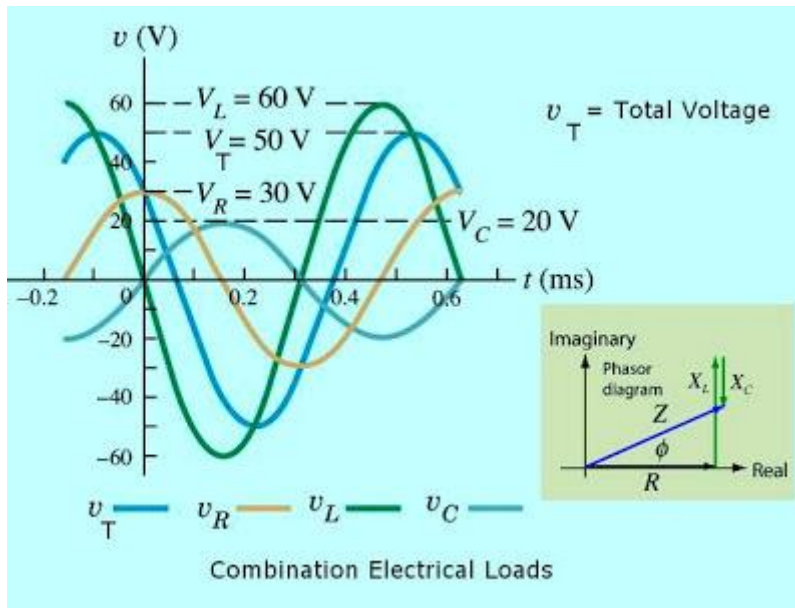
Pri indukčnej zát'aži je priebeh opačný ako v predošlom prípade, teda napätie predbieha prúd o 90° stupňov (obrázok 3). Ako indukčnú zát'az môžeme považovať transformátor.



Obrázok 3: Priebeh napätia a prúdu indukčnej zát'aži[2]

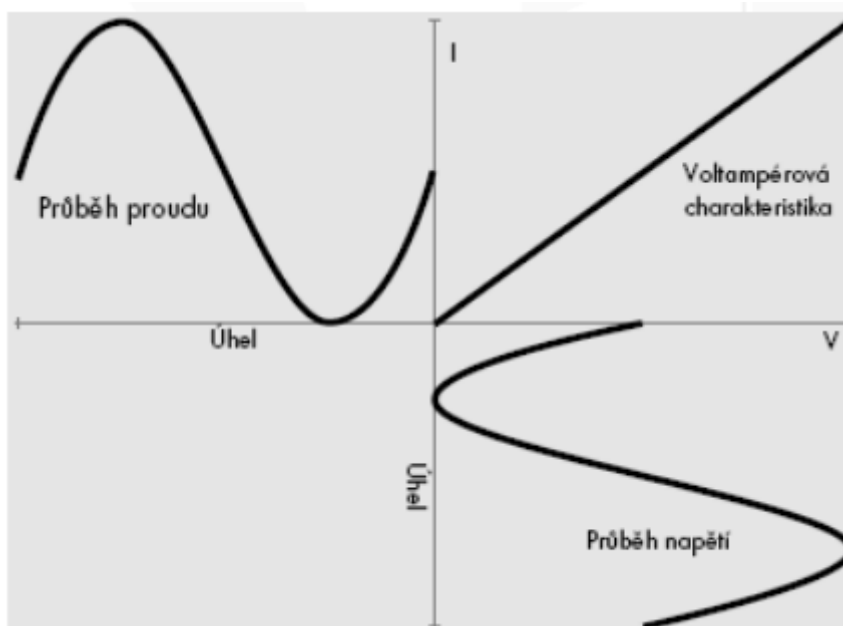
2.1.4 Kombinácia zát'aží

Ako príklad kombinácie zát'aží môžu byť káble a vodiče, kde všetky vodiče majú nejaký odpor za normálnych podmienok, a tiež vykazujú kapacitné a indukčné vplyvy. Obrázok 4 zobrazuje priebeh kombinácií rôznych lineárnych zát'aží.



Obrázok 4: Priebeh napätí a prúdov pri kombinovanej záťaži[2]

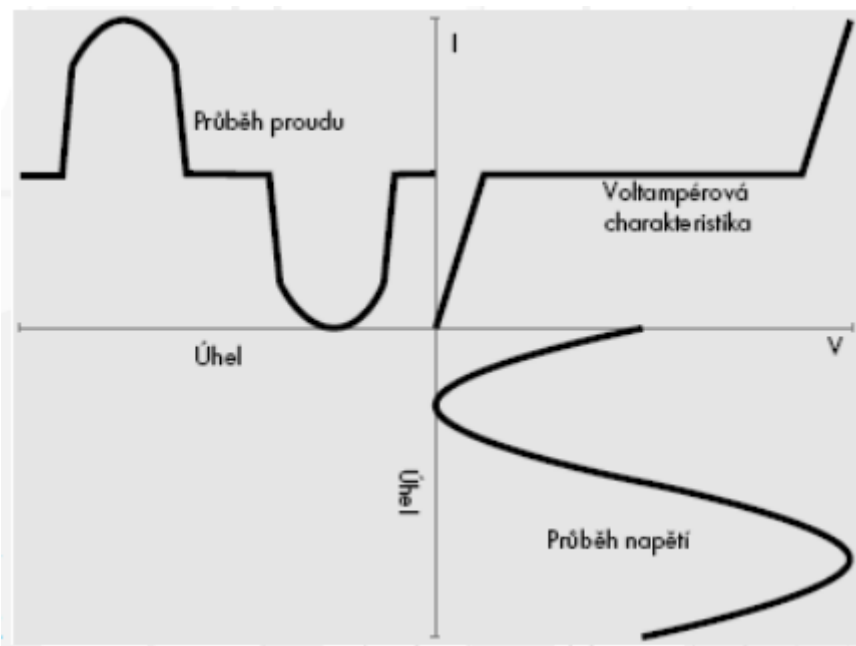
Lineárna záťaž má voltampérovú charakteristiku ako priamku, s rastúcim napätím lineárne narastá prúd, ktorého priebeh je tvarom a fázou totožný s napätím. Veľkosť pretekajúceho prúdu závisí na sklone V-A charakteristiky.



Obrázok 5: V-A charakteristika linearnej záťaže

2.2 Nelineárna zát'az

Pri nelineárnej zát'azi je tvar V-A charakteristiky zložitejší ako pri lineárnej zát'azi. Charakteristika dosahuje rôzne sklony a priebeh prúdu nie je rovnaký ako pri napätí, vzniká určité skreslenie. Tvar V-A charakteristiky závisí na napäťovej závislosti použitých súčiastok a na dejoch, ktoré v zát'azi prebiehajú. Furierovou transformáciou môžeme rozložiť tvar sínusoidy prúdu na radu sínusoviek o rôznych amplitúdach, ktorých frekvencia je celým násobkom fundamentálnej frekvencie (50 Hz). Súčtom okamžitých hodnôt týchto sínusoviek je možné priebeh prúdu rekonštruovať. Jedná sa teda o výskyt vyšších harmonických, kde percentný podiel ich súčtu vzhľadom k základnej harmonickej je ukazovateľom činiteľa THD.



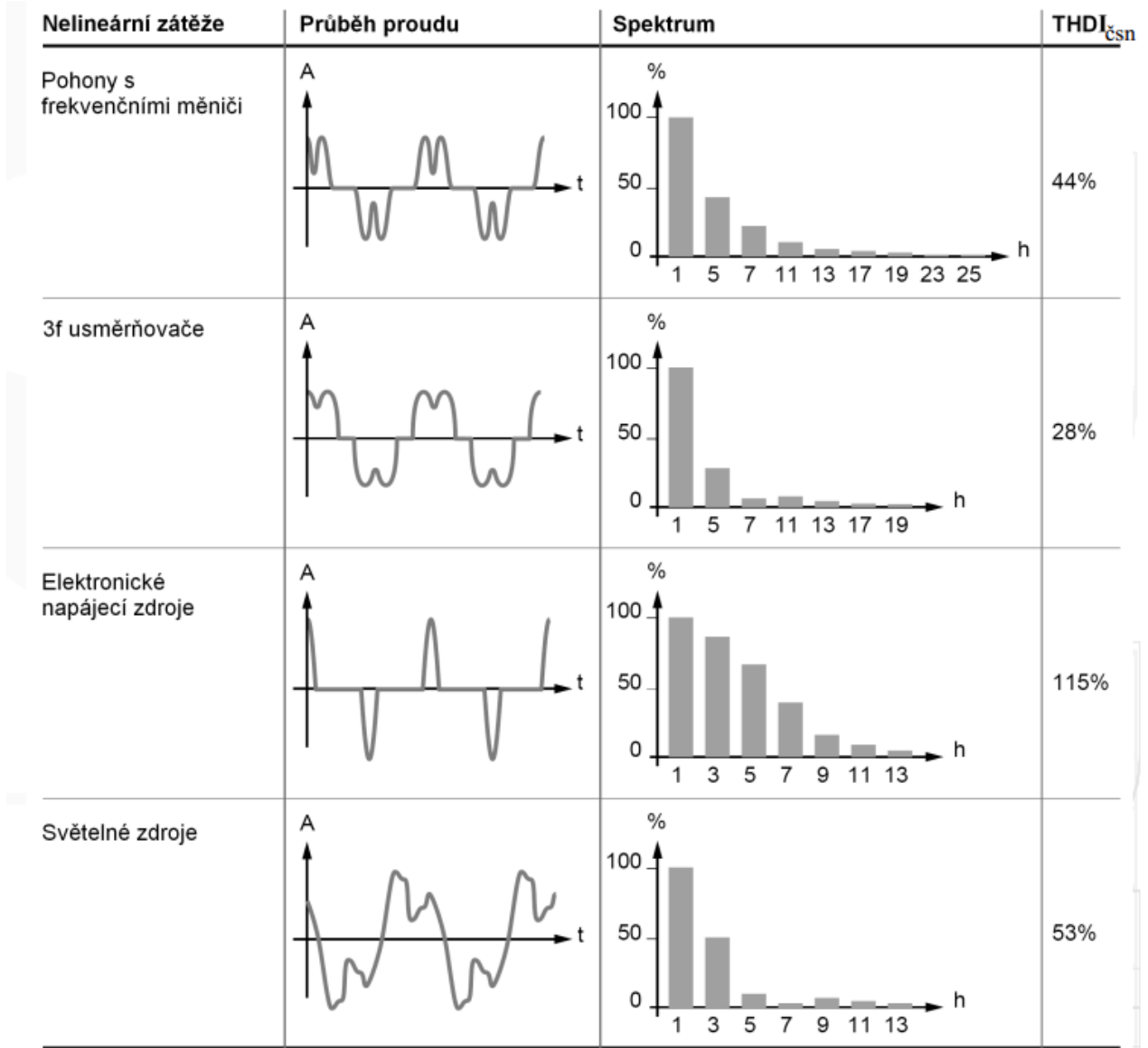
Obrázok 6: V-A charakteristika nelineárnej zát'aze [12]

2.2.1 Nelineárne zát'aze a zdroje

Medzi nelineárne zát'aze (zdroje harmonických v napájacej sieti) patria spotrebiče ktoré odoberajú neharmonický prúd, zdroje elektrickej energie generujúce neharmonické napätie a dodávajúce neharmonický prúd. Môžu sem patriť aj prvky elektrickej siete, ktoré svojou nelinearitou a vzájomnou väzbou môžu generovať vlastné kmity, či zosilňovať účinky primárnych zdrojov neharmonických prúdov a napätí. Na obrázku 7 sú zobrazené príklady nelineárnych zát'azí.

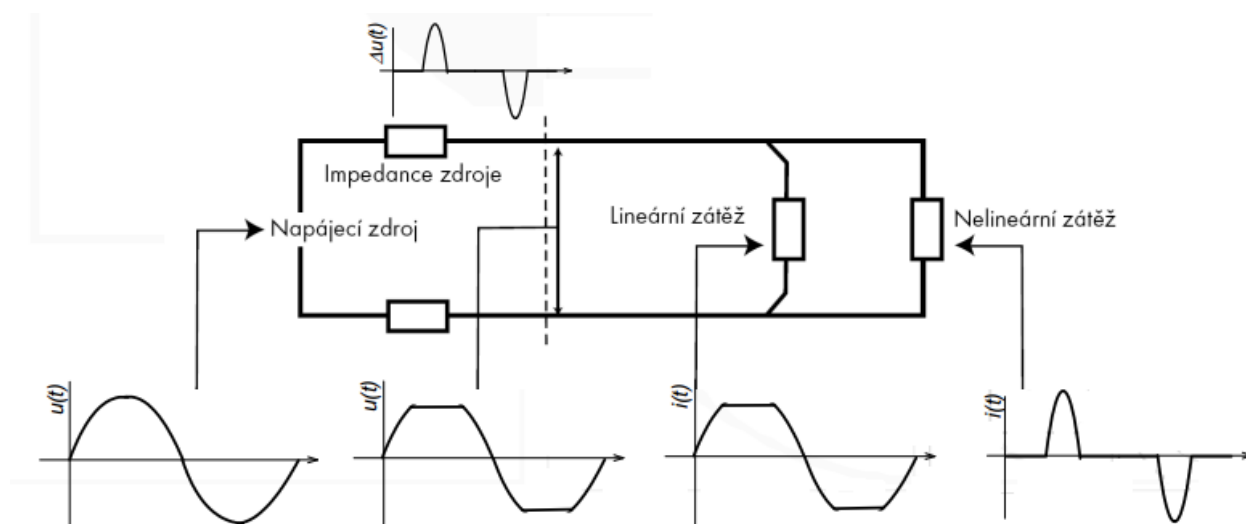
Medzi typické spotrebiče odoberajúce neharmonické prúdy patria [12]:

- Spotrebiče so silovými obvodmi založenými na výkonovej elektronike: riadené a neriadené usmerňovače pre DC motory a iné zát'aze AC pohony (motory, soft štartéry), spínacie zdroje (domáca elektronika)
- Spotrebiče pracujúce s elektrickým oblúkom: oblúkové pece, výbojové zdroje svetla (s indukčným predradníkom)
- Spotrebiče lineárne napájané neharmonickým napätím



Obrázok 7: Zobrazenie priebehov rôznych druhov nelineárnych zátŕaží[12]

Ďalej v sieti zaznamenávame skreslenie napätia ktoré je spôsobované priamo pripojenými zdrojmi elektrickej energie ako sú: statické striedače (PV systémy, veterné elektrárne so synchronným generátorom a polovodičovým meničom atď.): v dôsledku zvlnenia napájacieho napätia na DC strane, pulsné-šírkové modulácie výstupného napätia striedače, nelinearity výstupných filtrov či väzbového transformátoru. Celkové harmonické skreslenie napätia je od 2 do 10 % (podľa výkonu). Alebo neharmonickými úbytkami napätia na impedancie siete v dôsledku prechádzajúceho neharmonického prúdu. Príklad popísanej situácie je zobrazený na obrázku č.8:



Obrázok 8: Zobrazenie priebehov napätí a prúdov od napájacieho zdroja po nelineárnu záťaž [12]

3 KVALITA ELEKTRICKEJ ENERGIE

Každý odberateľ elektrickej energie požaduje dodávku elektrickej energie v požadovanom množstve a kvalite. Množstvo je charakterizované ako dodávkou elektrickej práce, čo predstavuje prúdové zaťaženie elektrizačnej sústavy v závislosti na mieste pripojenia odberateľa. Kvalita elektrickej energie znamená dodržanie parametrov dodávky odberového množstva v príslušnej hodnote zo systému ktorý prevádza dodávku. Za parametri elektrickej energie alebo inak povedané systémové veličiny považujeme [4]:

- frekvenciu
- napätie

Elektrická energia vyrobená v elektrárni v predpísanej štandardnej kvalite sa prostredníctvom elektrizačnej sústavy, teda prenosových a distribučných sietí dodáva až ku konečnému odberateľovi. Behom tejto cesty pôsobí na elektrickú energiu mnoho vonkajších faktorov, ktoré môžu mať vplyv na konečnú kvalitu elektrickej energie. Medzi tieto faktory napríklad patria:

- atmosférické vplyvy (účinnok blesku),
- vplyvy spôsobené používaním niektorých elektrických spotrebičov (napr. elektronické regulátory výkonu a otáčok, napájacie zdroje a podobne),
- vplyvy spôsobené nutnými prevádzkovými manipuláciami v sieti,
- pôsobenie ochrán a automatizačných prostriedkov slúžiacich k obmedzeniu poruchových stavov siete,
- časté spínanie veľkých spotrebičov

Kvalita elektrickej energie je udávaná prevádzkovými hodnotami (charakteristikami) systémových veličín, ktoré sú garantované prevádzkovateľom siete behom normálneho stavu elektrizačnej sústavy. Jednotlivý kvalitatívny ukazovateľ špecifikujú:

- kmitočet siete,
- veľkosť napájacieho napätia,
- odchýlky napájacieho napätia,
- rýchle zmeny napätia (veľkosť rýchlych zmien a miera vnemu flikru),
- krátkodobé poklesy napájacieho napätia,
- krátkodobé prerušenie napájacieho napätia,
- dlhodobé prerušenie napájacieho napätia,
- dočasné prepätie o sieťovom kmitočte živými vodičmi a zemou,
- prechodné prepätia medzi živými vodičmi a zemou,
- nesymetria napájacieho napätia,
- harmonické napätie,
- medziharmonické napätie úrovni napätia signálov v napájacom napätí.

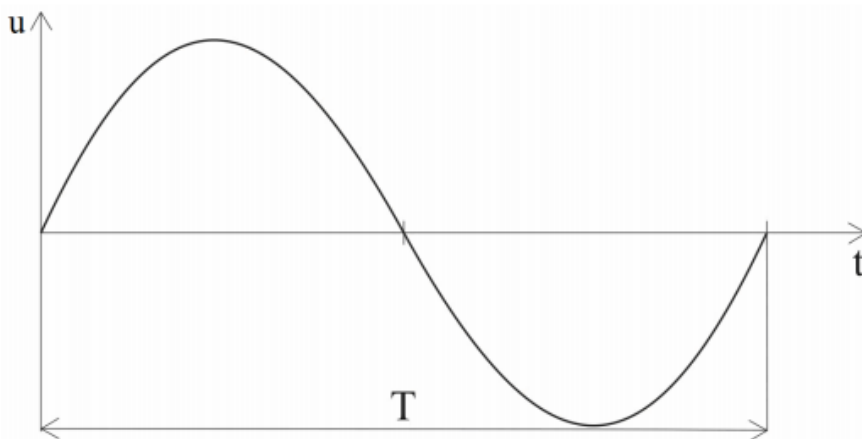
Pre tieto charakteristiky ktoré platia pre odberové miesta z distribučnej sústavy s napäťovou úrovňou nízkeho napätia a vysokého napätia sa stanovujú:

- zaručované hodnoty,
- meracie intervaly,
- doby pozorovania,
- medzné pravdepodobnosti splnenia stanovených limitov.

Kvalitatívne parametre elektrickej energie sú uvedené v normách ČSN EN 50 160 a ČSN IEC 38. Pre spotrebiteľa elektrickej energie sú tieto hodnoty parametrov definované pre spoločné napájanie PPC (Point of Common Coupling) bod ku ktorému sú spotrebitelia pripojení. Napájací bod je miesto verejnej rozvodnej siete elektricky najbližšie k príslušnému odberateľovi, v ktorom je alebo môže byť pripojený iný odberateľ. Obvykle je to miesto merania odberu elektrickej energie odberateľom.

3.1 Frekvencia

Frekvencia alebo kmitočet udáva, koľko pravidelných dejov (cyklicky sa opakujúcich) odohrá za jednu sekundu. Teda pre napájacie napätie je to počet periód behom 1 sekundy. Zobrazenie periódy je na *obrázku 9*.



Obrázok 9: Perióda sínusového napätia[5]

$$T = \frac{1}{f} \quad [\text{s}] \quad (3.1)$$

$$f = p \cdot \frac{n}{60} \quad [\text{Hz}] \quad (3.2)$$

Menovitý kmitočet je 50 Hz, za normálnych prevádzkových podmienok musí byť frekvencia siete v povolenej tolerancii $\pm 1 \%$ po 99,5 % roka. Systémy ktoré udržujú kmitočet v príslušných medziach sú primárne a sekundárne regulácia v elektrizačnej sieti. Udržanie konštantnej frekvencie vyžaduje dostatočný výkon výroby, ktorý sa prispôbuje odberu v reálnom čase.

3.2 Napätie

Hodnota napätia je definovaná pre PPC. Zátážný prúd, ktorý tečie privodom vedenia ku spotrebiteľovi vyvoláva úbytky napätia, ktoré sú úmerné vzdialenosti spotrebiteľa od PPC. Zátáž na strane spotrebiteľa je premenlivá v čase. Hodnota napätia je teda funkčnou závislosťou jak na vzdialenosti tak aj na čase. Za normálnych prevádzkových podmienok musí byť napätie v sieti v povolenej tolerancii $U_n = \pm 10 \%$ v PPC. V tejto tolerancii musí byť 95 % priemerných efektívnych hodnôt napájacieho napätia v meracích intervaloch 10 minút behom každého týždňa.

3.2.1 Úbytok napätia

Rozdiel medzi napätím v PPC U_1 a napätím v samostatnom mieste odberu sa dá definovať ako[4]:

$$\Delta U = U_1 - U \quad [\text{V}] \quad (3.3)$$

$$\Delta U = \frac{(U_1 - U)}{U_n} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.4)$$

Úbytok napätia sa spočíta ako:

$$\Delta \bar{U} = I_c \cdot R_s - I_j \cdot X_s \quad [\text{V}] \quad (3.5)$$

Pre výpočet úbytku napätia pre základnú harmonickú by mala byť braná v úvahu impedancia pre jednofázové odbery:

$$Z_f - Z_n \quad \text{fázový + stredný vodič,}$$

a

$$Z_f,$$

pre symetrické trojfázové odbery.

Pre analýzu spotrebiteľskej siete nízkeho napätia sú doporučené hodnoty impedancií:

$$Z_f = 0,24 + j0,15 \quad [\Omega] \quad (3.6)$$

Impedancia. Ktorá spôsobuje úbytok napätia je zložená z dvoch častí, ktorá je daná rozptylovou reaktanciou transformátoru a odporom vodiča nízkeho napätia. Vzhľadom k pomeru oboch častí je možné v sieťach nízkeho napätia predpokladať, že pokles napätia medzi napájacím bodom a spotrebičom bude:

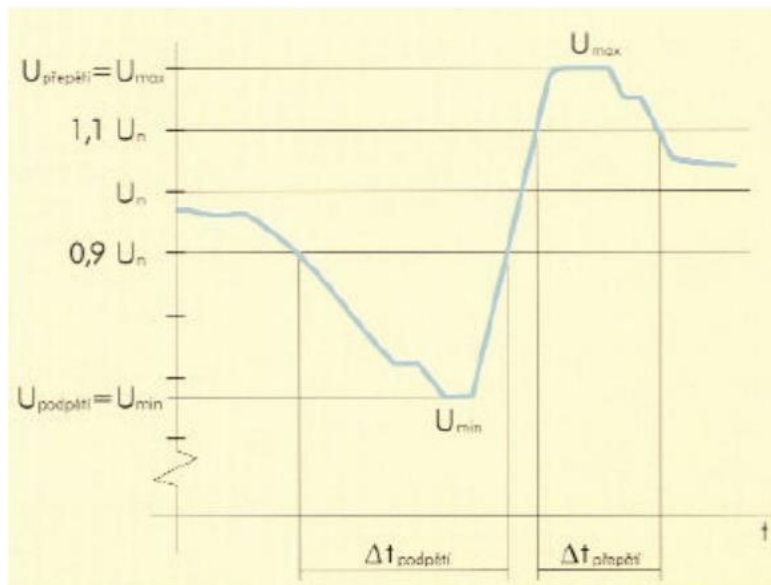
$$\Delta U \approx R \cdot I^2 \quad [\text{V}] \quad (3.7)$$

3.2.2 Pokles napätia a prepätie

Pokles napätia je definovaný pomocou efektívnej hodnoty napätia a je charakterizovaný:

- Trvaním napäťového poklesu
- Najmenším pomerným napätím v dobe poklesu napätia

Časový interval sa začína merať, keď poklesne pod 90 % U_n a končí po jeho opätovnom náraste nad 90 %



Obrázok 10: Pokles napätia pod 1% menovitej hodnoty - prerušenie napätia[9]

V trojfázovom systéme považujeme pokles napätia za normálny v ktorejkoľvek fáze za pokles napätia celého systému. Prepätie je charakterizované rovnako, ale pre prekroenie hodnoty 110 % U_n .

Veličiny popisujúce pokles napájacieho napätia:

- hĺbka poklesu ΔU - [%] tvorí percentuálny rozdiel medzi referenčným napätím a zvyškovým napätím
- zvyškové napätie U_{rmet} - minimálna hodnota napätia zaznamenaná počas poklesu udávaná ako percentuálna alebo pomerná hodnota referenčného napätia;
- trvania poklesu Δt - [s] časový interval označuje dobu trvania poklesu napätia od zníženia pod prahovú hodnotu, do okamihu návratu na hodnotu prahovú alebo vyššiu, plus prípadné hysterézne napätie, čo je okrajová hodnota prahu napätia používaná pre meranie.

3.2.3 Prepätie

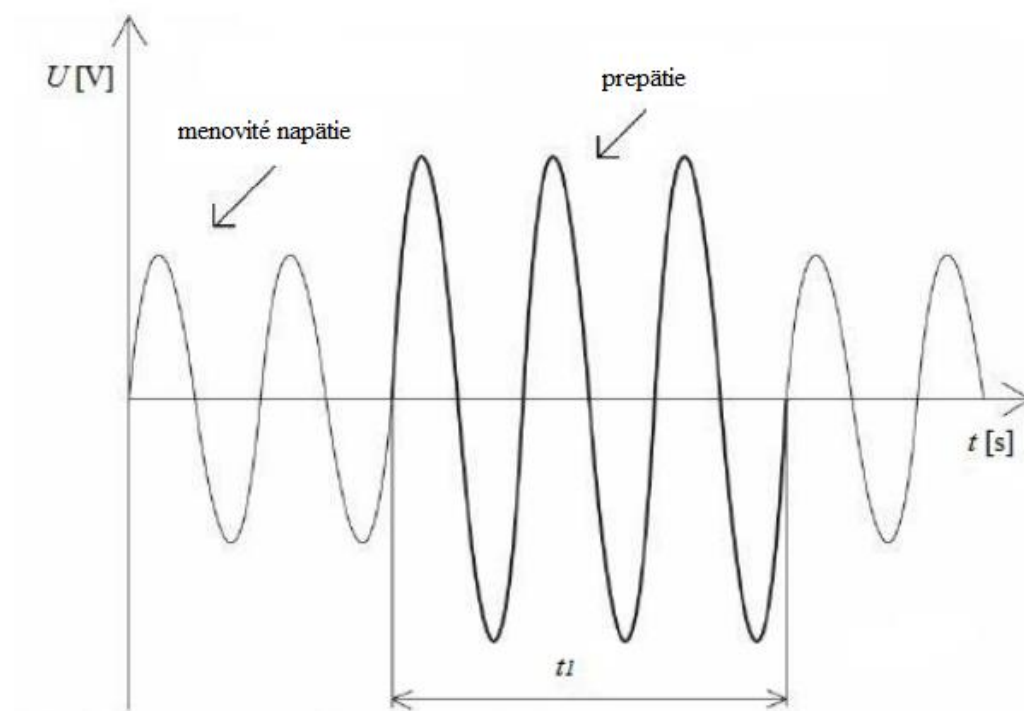
Prepätia v trojfázových striedavých sústavách je vo svojej podstate akékoľvek napätie medzi fázami alebo medzi fázou a zemou, ktoré svojou veľkosťou prekračuje amplitúdu menovitého napätia. Prepätia sa líšia svojou veľkosťou, časovým priebehom, príčinou jeho vzniku a frekvenciou výskytu.

Prepätia v elektrických sieťach vzniká v dôsledku prevádzkových manipuláciach a zmien, sprevádzaných prechodovými dejmi (napr. tzv. spínacie prepätie), v dôsledku rezonancie alebo v dôsledku vonkajších príčin (atmosférické prepätie). Elektrické zariadenia je nutné konštruovať tak, aby vydržali určitú úroveň prepätia po určitú dobu. Proti prepätiu (pri ktorom sa zariadenie môže poškodiť) je nutné zariadenie chrániť vhodnou ochranou (bleskozvody, uzemňovacie laná, ochranné iskrisco, zvodnice prepätia).

3.2.3.1 Dočasné prepätia o sieťovom kmitočte medzi živými vodičmi a zemou

Dočasná prepätia o sieťovom kmitočte medzi živými vodičmi a zemou v sieti NN sú následkom porúch v sieťach VN. Podľa normy ČSN EN 50160 sa dá povedať, že dočasné prepätia o sieťovom kmitočte sa všeobecne objavujú počas porúch (v distribučnej sieti alebo v inštalácii používateľa) a zaniknú po odstránení poruchy. Trvanie a veľkosť týchto prepätí závisí predovšetkým na zemnú impedanciu siete VN.

Distribučné siete NN sa väčšinou prevádzkujú s účinne uzemneným uzlom. V prípade, že nastane zemné spojenie v sieti VN, ktoré zvýši zemný potenciál v blízkosti siete NN, môže sa v sieti NN vytvoriť prepätie medzi fázovými a uzemnenými vodičmi. Doba trvania je obvykle obmedzená odpojením do 5 s (čas ochrán VN a vypínač). Veľkosť prepätia všeobecne neprekročí hodnotu 1,5 kV -efektívna hodnota, závisí na zemnej impedancie NN siete a na veľkosti prúdu zemného spojenia v sieti VN.



Obrázok 11: Priebeh dočasného prepätia ktoré trvá čas t_1 [4]

3.2.4 Pôvody poklesu napätia a prepätia

Pokles napätia môže byť spôsobený spotrebiteľmi, alebo vplyvom stavu v rozvodnej sieti. Zo strany distribučnej stanice môže dôjsť:

- Prerušenie napájania

- Poklesu napätia (prepätie)

Prerušenie môže byť krátkodobého alebo dlhodobého charakteru, napríklad: skrat, chyby sieťového zariadenia. Dlhšie prerušenie sa nazýva výpadok napájania.

Pokles napätia môže byť spôsobený napríklad, pomalým riadením regulácie napätie v sieti (náhle odľahčenie záťaže).

Pokles napätia alebo poruchové udalosti spôsobené užívateľmi majú v prípade dobre navrhutej DS malý vplyv na napätie v PPC. To znamená, že ďalší spotrebitelia, ktorý sú pripojení k tomuto bodu, nie sú ovplyvnený.

3.2.5 Poruchy a ich pôsobenie na spotrebiteľskú sieť

Udalosti a faktory pôsobiace pokles napätia a ich následky:

- Zmena veľkosti napätia (charakter poklesu napätia),
- Rušenie rádiové frekvencie (TV, rádio),
- Prehrievanie kontaktov, možnosť požiaru,
- Zlyhanie zariadení citlivých na pokles napätia.

Spotrebiče s veľmi dynamickým prúdovým odberom (mikrovlnné rúry, vysávače, bojler, rôzna svietidlá atď.):

- Pokles napätia v priebehu dynamického prúdového odberu,
- Zlyhanie zariadení citlivých na pokles napätia.

3.2.6 Krátkodobé poklesy a prerušenie napätia:

Poklesy a krátke prerušenia napätia sú nepredvídateľné, väčšinou náhodné javy, ktoré sa najlepšie popisujú štatistickým spôsobom.

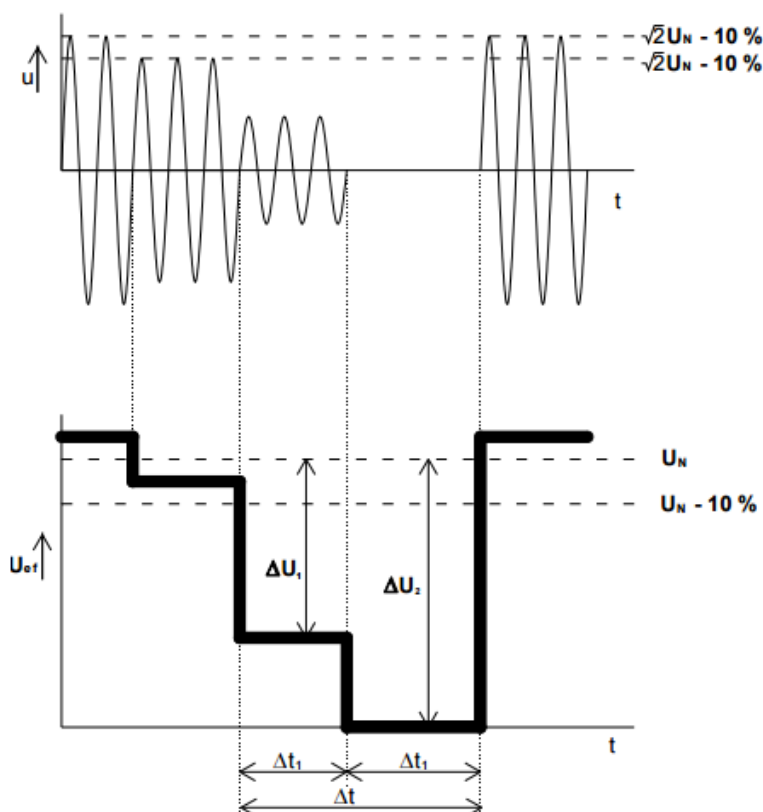
- Pokles napätia je redukcia napätia v bode elektrickej siete nasledovaná obnovením napätia po krátkom časovom úseku od polovice periódy siete do niekoľkých sekúnd.
- Krátke prerušenia napätia je vymiznutie napájacieho napätia po dobu nepresahujúca 1 minútu. Krátke prerušenie napätia môže byť považované za pokles napätia s hĺbkou 100%.
- Hĺbka poklesu napätia je definovaná ako rozdiel medzi napätím počas poklesu napätia a menovitým napätím siete. Hĺbka sa vyjadruje v percentách menovitého napätia.

Pokles napätia ktorého hĺbka je konštantná počas jeho trvania môže byť charakterizovaná dvoma hodnotami, hĺbkou ΔU a trvaním Δt .

Niekoľko poklesov napätia môže byť charakterizované dvoma alebo viac párami hodnôt (ΔU , Δt). Takéto poklesy komplexného tvaru sú však pomerne zriedkavé a pre praktické účely môžu byť charakterizované ich maximálnou hĺbkou a celkovým trvaním.

Zmeny napätia, ktoré nezmenšujú napätie siete v bode, ktorý sa vyšetruje, na menej ako 90 % menovitého napätia, nie sú považované za poklesy napätia. Tieto zmeny sú v oblasti odchýlok napätia (spôsobenými stupňovitými zmenami záťaženia) a v oblasti kolísanie napätia, spôsobeného rýchlymi a opakujúcimi sa zmenami záťaženia.

Dva parametre ΔU a Δt , hĺbka a trvanie, nemôžu byť v rozvodných sieťach prakticky obmedzované pasívnymi prvkami (filtre). Jedinou možnosťou je preklopenie poklesov a krátkych prerušení napätia z náhradného zdroja. Pre danú sieť môže byť, ako jej charakteristická vlastnosť, stanovená frekvencia výskytu poklesov napätia s hĺbkami a trvaním obsiahnutými v danom intervale. Hĺbky však nie sú nevyhnutne rovnaké vo všetkých troch fázach.

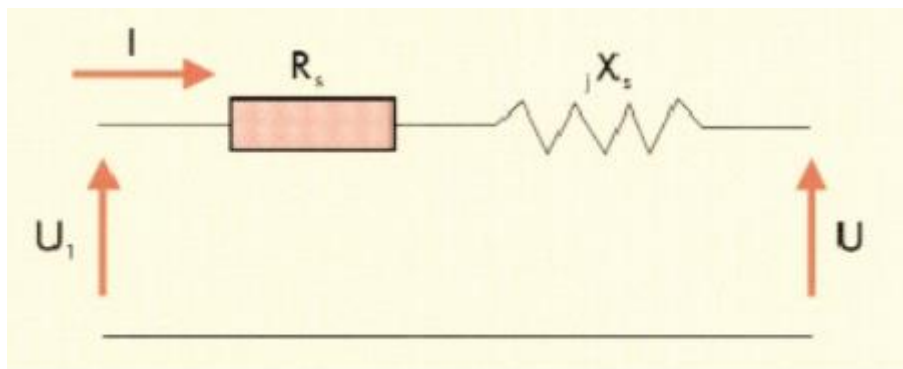


Obrázok 12: Znázornenie poklesu a prerušenie napätia

3.3 Flicker

3.3.1 Definícia rýchlej zmeny napätia – flicker

Sú to rýchle periodické zmeny napätia, ktoré sa nazývajú kolísanie napätia. Tento jav sa prejavuje na svetelných spotrebičoch rýchlou zmenou svetelného toku a spôsobuje zmenu zrakového vnímania, ktorá ruší pri rôznej činnosti. Tieto zmeny možno popísať pomocou obrázku 13:



Obrázok 13: Jednofázový náhradný obvod napájacej siete[9]

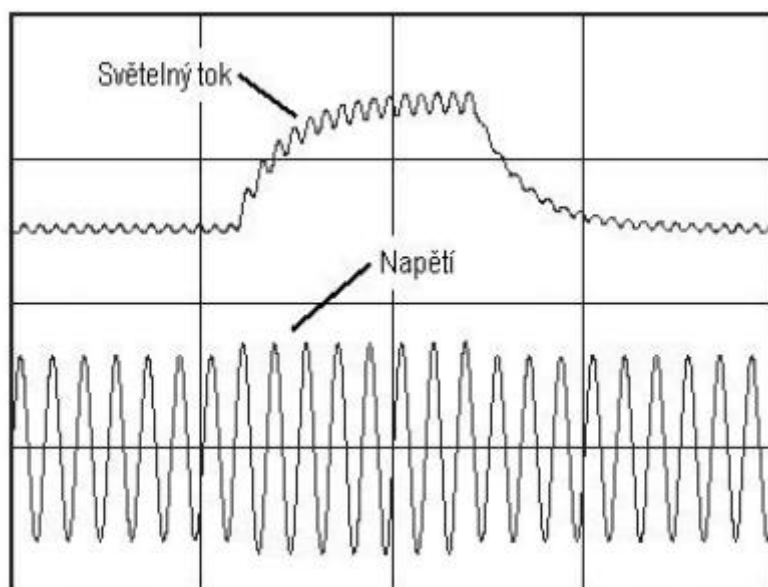
Napätie na spotrebiči je menšie ako napätie U_1 vplyvom úbytku napätia. Úbytok napätia možno vyjadriť ako:

$$U = |U_1| - (I_{\epsilon} \cdot R_s + I_j \cdot X_s) = |U_1| - \frac{1}{3 \cdot U^*} (P \cdot R_s + Q \cdot X_s) \quad (3.8)$$

Z vyššie uvedeného vyplýva, že zmeny napätia závisí na zmenách činného a jalového výkonu. Zmeny napätia pri zmenách zaťaženia možno vyjadriť:

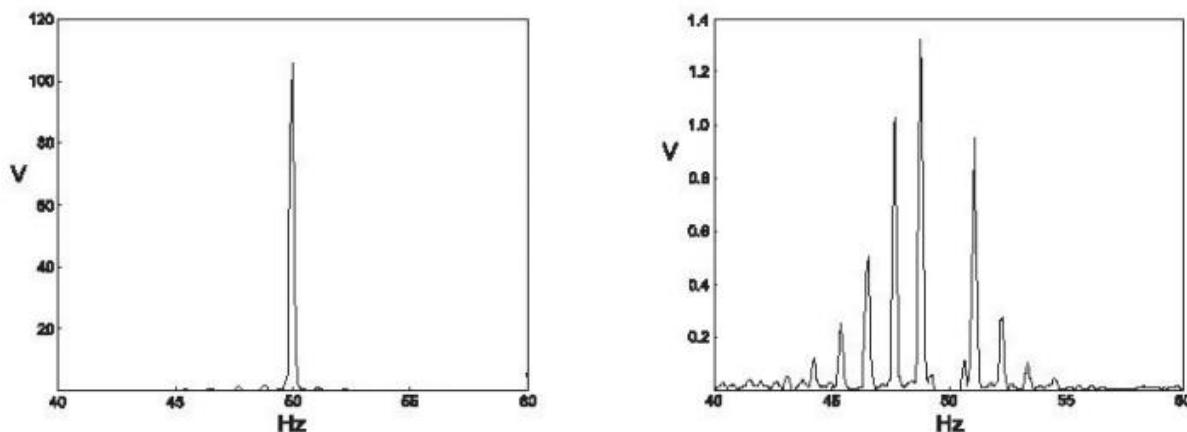
$$\delta U \cong \frac{1}{3 \cdot U^*} \cdot (\delta P - R_s + \delta Q \cdot X_s) = \Delta I_{\epsilon} \cdot R_s + \Delta I_j \cdot X_s = \delta(\Delta U) \quad (3.9)$$

Elektrické svetelné zdroje (napr. žiarovka), pripojené na verejnú distribučnú sieť vyžadujú pre správnu funkciu konštantné napätie. Odberatelia s premenlivým výkonom však spôsobujú meniace sa úbytky napätia. Rýchle periodické zmeny napätia, tzv. Kolísanie napätia, spôsobujú jav zvaný flickr. Flickr sa prejavuje zmenou zrakového vnímania, ktorá ruší človeka pri jeho činnosti. Vplyv na zrakový vnem je vyvolaný časovými zmenami svetelného toku, čo je spôsobené práve rýchlymi zmenami napätia, ako naznačuje obrázok 14:



Obrázok 14: Zmena svetelného toku žiarovky spôsobená zmenou napätia[6]

Opakujúce sa malé zmeny amplitúdy sieťového napätia spôsobujú blikanie svetelných zdrojov. Tento jav je populárno označovaný ako "flikr" a je významným parametrom kvality elektrickej energie. Príklad spektra sieťového napätia, kde je zjavný flikr, je ukázaný na *obrázku 15*. Zobrazené spektrum je typickým pre napätie siete, ktorá napája veľký nestacionárny elektrický pohon. Žiarovka, napájaná z rovnakého uzla, bude blikať s frekvenciou okolo 1 Hz[4].



Obrázok 15: Spektrum napätia napájacej siete; v grafe vpravo je potlačená zložka 50 Hz[6]

Spotrebiče a prevádzkové stavy spôsobujúce flikr:

- Spínanie veľkej záťaže,
- Rozbeh veľkých motorov,
- Premenná záťaž,
- Elektrické oblúkové pece.

Rušivý vplyv flikru je ťažké objektívne zmerať. Metóda merania flikru vychádza z modelu simulujúci reťazec: "napäťová zmena - svetelný zdroj - oko - proces vnímania v ľudskom mozgu". Napäťové zmeny majú dve charakteristiky ovplyvňujúce rušivý vplyv flikru, a to v závislosti na amplitúde a frekvencii. Bolo zistené, že človek je najcitlivejší na zmeny napätia o frekvencii 8,8 Hz. Rušivý vplyv flikru sa určuje pomocou flikrmetru - "Merač blikania". Obtiažovanie spôsobené flikrom je funkciou intenzity vnímania a trvania pôsobenia. Závažnosť flikru sa potom opisuje dvoma parametrami[6]:

- Krátkodobá miera flikru P_{st} (meranie po 10 minútach)
- Dlhodobá miera flikru P_{lt} (meranie po 120 minútach)

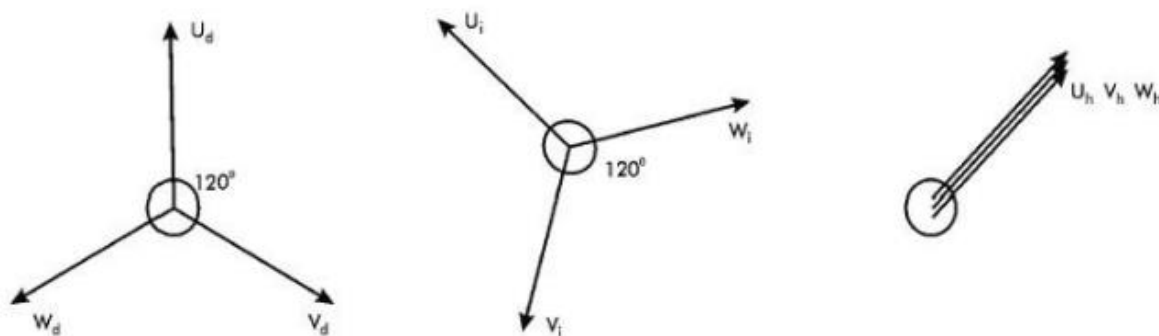
Limit je stanovený len pre dlhodobú mieru flikru, ktorá sa pre opis napájacieho napätia považuje za dôležitejšie. Norma ČSN EN 50160 udáva, že za normálnych prevádzkových podmienok musí byť po 95% času, v ľubovoľnom týždennom období, dlhodobá miera vnemu fliker $P_{lt} \leq 1$. Dlhodobá miera flikru je vypočítaná z dvanástich hodnôt krátkodobej miery flikru, teda 2 hodinový interval, za použitia vzťahu:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}} \quad (-) \quad (4.0)$$

Podľa normy ČSN EN 50160 flikr spôsobuje pre každého subjektívnu reakciu, ktorá je závislá na príčine flikru a na dĺžke doby jeho výskytu ($P_{lt} = 1$ môže spôsobiť ťažkosti, zatiaľ čo inokedy vyššia hladina P_{lt} ťažkosti nespôsobí). Z toho vyplýva, že zariadenie spôsobujúce fliker podlieha určitým emisným limitom. Úroveň rušenia zariadení je funkciou veľkosti prúdu a vzťažnej impedancie.

3.4 Nesymetria napájacieho napätia

Nesymetria napätia je v trojfázovej distribučnej sústave všeobecne spôsobená nerovnomerným zaťažením v dvoch alebo troch fázach jednofázovými zaťažienami. Nesymetria napätia je priamo závislá na veľkosti jednofázovej záťaže v percentách menovitého výkonu a na veľkosti impedancia napájacej distribučnej sústavy. Nesymetria napätia je stav, v ktorom sa napätia trojfázovej rozvodnej distribučnej sústavy líšia v amplitúde, alebo sú odchýlky od ich normálneho fázového posunu 120° , alebo oboje. Podľa výsledku súčtu fázorov jednotlivých fáz môže byť nesymetrická sústava nevyvážená (súčet fázorov je rôzny od nuly) alebo sústava vyvážená (súčet fázorov je rovný nule).[7]



Obrázok 16: Grafické zobrazenie symetrických zložiek[7]

3.4.1 Zdroje nesymetrie napätia

Prevládajúce príčina nesymetrie je nesymetrické jednofázové zaťaženie. V distribučných sústavách nízkeho napätia sú jednofázové spotrebiče takmer výlučne pripájané medzi fázami a stredný vodič avšak s rozložením viac či menej rovnomerným do všetkých troch fáz. V distribučných sústavách vysokého a veľmi vysokého napätia môžu byť jednofázové zaťaženia pripojené buď medzi fázami alebo medzi fázou a stredným vodičom. Významné jednofázové odbory sú napájacie stanice striedavej trakcie a jednofázové pece. Nesymetria napätia spôsobená jednofázovým zaťažením pripojeným medzi dve fázy je prakticky rovná pomeru príkonu zaťaženie a trojfázového skratového výkonu siete. Spätá zložka napätia sa šíri zo siete nižšej úrovne do siete vyššej úrovne napätia s veľkým útlmom. V smere z vyššej do nižšej úrovne závisí útlm na prítomnosti točivých strojov, ktoré majú vyrovnávajúci účinok.[7]

3.4.2 Účinky nesymetrie napätia

Značná nesymetria napätia spôsobuje zvýšený ohrev transformátora. Určenie či transformátor je schopný napájať jednofázové záťaže, ktorých príkon je značným percentom menovitého výkonu transformátora, by malo byť konzultované s výrobcom.

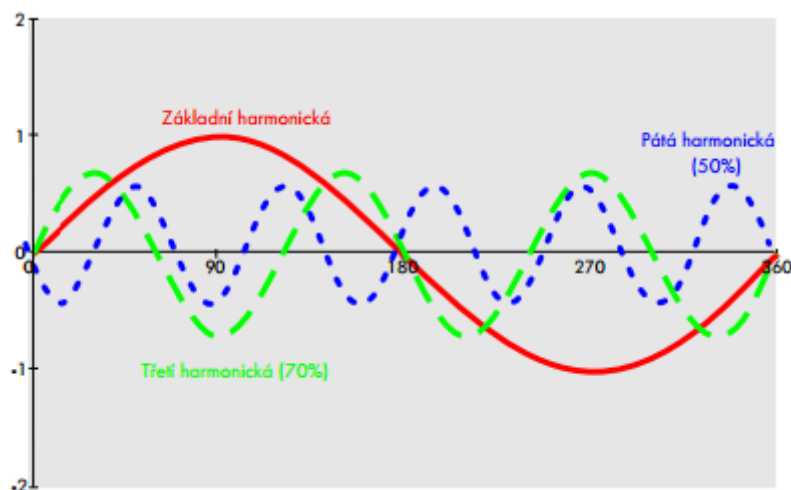
Spätá impedancia trojfázového indukčného stroja odpovedá jeho impedancii pri rozbehu. Preto stroj pracujúci s nesymetrickým napájaním bude odoberať prúd so stupňom nesymetrie niekoľkonásobným v porovnaní s napájacím napätím. Následkom toho sa môžu trojfázové prúdy značne líšiť a zvýšený ohrev vodičov (vinutie) vo fáze s väčším prúdom bude len čiastočne vyrovnaný zmenšeným ohrevom v ostatných fázach a ohrev stroja bude narastať.

Napríklad nesymetria spôsobí pretekanie spätnej zložky prúdu trojfázovým indukčným motorom, ktorá bude redukovať výstupný krútiaci moment pri menovitom prúde alebo pri

menovitom výstupe spôsobí nadmerný ohrev motora. V niektorých motoroch môže nesymetria 3% mať za následok zníženie menovitého výstupu o 10%.

3.5 Harmonické

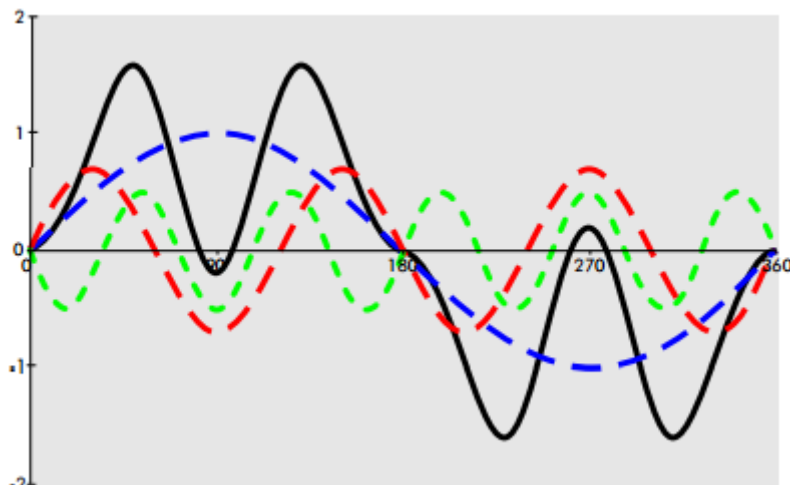
Harmonické frekvencie sú celé násobky základnej harmonickej napájacieho napätia, tzn. pri základnej harmonickej 50 Hz je tretia harmonická 150 Hz a piata harmonická je 250 Hz. Obrázok 17 ukazuje sínusový priebeh základnej, tretej a piatej harmonickej.[9]



Obrázok 17: Základná harmonická, tretia a piata harmonická[9]

Obrázok 17 ukazuje priebeh základnej harmonickej s obsahom 70% tretej harmonickej a 50% piatej harmonickej. V skutočnosti bude väčšina deformovaných priebehov prúdu oveľa zložitejšia, ako je v tomto prípade a bude obsahovať oveľa viac harmonických so zložitejším fázovým posuvom.

Obrázok 18 ukazuje časový priebeh, ktorý nie je iba sínusový, čo znamená, že bežné meracie prístroje, ako je napríklad multimeter merací efektívne hodnoty, nebude merať správne. Na obrázku je vidieť, že takto deformovaný priebeh prúdu obsahuje šesť prechodov nulou za periódu, namiesto obvyklých dvoch a teda každé zariadenie, ktoré využíva prechod prúdu nulou ako referenčnú nebude fungovať správne. Skutočnosť, že takýto priebeh obsahuje aj iné harmonické, než iba základné, musia byť vždy brané do úvahy.



Obrázok 18: Deformovaný časový priebeh prúdu [9]

3.5.1 Harmonické napätie a prúd

Harmonické napätie U_h je definované ako napätie s kmitočtom rovným celému násobku základného kmitočtu napájacieho napätia v sieti. Harmonická napätie možno rozpoznať nasledujúcimi spôsobmi [9]:

- jednotlivo, pomocou ich relatívnej amplitúdy U_h vzťahujúce sa k napätiu základnej harmonickej
- súhrnne, pomocou činiteľa celkového harmonického skreslenia THD

Harmonické popisujeme frekvenciou alebo pomerom k základnej frekvencii (tzn. rád harmonickej). Parameter charakterizujúci nelinearitu sa nazýva činiteľ harmonického skreslenia THD:

Kde pre prúdy platí:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{25} (I_k)^2}}{I_1} \quad (-; A, A) \quad (4.1)$$

Pre napätie platí:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{25} (U_k)^2}}{U_1} \quad (-; V, V) \quad (4.2)$$

Kde I_1 a U_1 je prúd a napätie základnej harmonickej, I_k a U_k je prúd a napätie k -tej harmonickej kde k značí rád harmonickej. Maximálny rád harmonickej je uvedený ako 25., čo je horná hranica pre ktorú sú normou uvedené hodnoty.

Harmonické napájacie napätie je spôsobené nelineárnym zaťažením užívateľmi pripojených do všetkých napäťových úrovní distribučných sietí. Harmonické prúdy, impedancia siete a harmonická napätia v odberných miestach siete sú časovo premenlivé.

Počas normálnych prevádzkových podmienok má byť v náhodnom týždennom období 95% desaťminútových stredných efektívnych hodnôt napätia všetkých harmonických menšie alebo rovné hodnote uvedenej v tabuľke 1. Pri jednotlivých harmonických môžu rezonancie spôsobiť napätie vyššie. THD napájacieho napätia, ktorý zahŕňa všetky harmonické až do rádu 40 (obmedzenie do rádu 40 prijaté dohodou v mnohých krajinách), má byť menšie alebo rovné 8%.

Tabuľka 1: Hodnoty harmonických napätí podľa normy [10]

nepárne harmonické				párne harmonické	
nie násobky 3		násobky 3			
rád harmonické h	harmonické napätie (Uh)	rád harmonické h	harmonické napätie (Uh)	rád harmonické h	harmonické napätie (Uh)
5	6,0%	3	5,0%	2	2,0%
7	5,0%	9	1,5%	4	1,0%
11	3,5%	15	0,5%	6...24	0,5%
13	3,0%	21	0,5%		
17	2,0%				
19	1,5%				
23	1,5%				
25	1,5%				
POZNÁMKA: Úrovně pre harmonické vyššieho rádu ako 25 sa neuvádzajú, pretože sú väčšinou malé, avšak vplyvom rezonančných javov veľmi ťažko predvídateľné.					

4 MODELOVANIE ZÁŤAŽE

Modely zát'aže patria medzi základné prvky, ktoré je nutne vhodne matematicky interpretovať pre použitie v simulačných schémach v oblastiach elektroenergetiky. Vhodná vnútorná štruktúra a správny výpočet parametrov zát'aže sú dôležité, pretože chovanie zát'aže ovplyvňuje chovanie celej simulačnej schémy, hlavne chovanie tokov činného a jalového výkonu, ktoré potom ovplyvňujú veľkosti napätí v jednotlivých uzloch obvodu a zát'aženie vetiev.

Modelovaná zát'až môže predstavovať jeden element elektrizačnej sústavy, teda spotrebič, alebo môže nahradzovať sústavu spotrebičov z časti rozvodnej siete, teda lokálny odber. Pre tieto účely je preto vhodné rozlišovať modely jednofázové a trojfázové. Pre trojfázové modely ešte pripadá špecifikum zapojenia jednotlivých fáz, a to do hviezdy či do trojuholníka. Dôležitú rolu hra zát'aženie jednotlivých fáz. V štandardných simuláciach sa uvažuje o súmerný odber čo do veľkosti, tak aj charakteru. To je možné akceptovať iba u trojfázových spotrebičov pracujúcich v bezporuchovom ustálenom stave, alebo s určitou chybou u hromadných odberov na hladine vysokého, či veľmi vysokého napätia. Ďalším parametrom, ovplyvňujúcim štruktúru modelu, je obsah vyšších harmonických. Drvivá väčšina jednofázových spotrebičov neodoberá výkon iba o základnej harmonickej. U týchto modelov je potom potrebné rešpektovať aspoň harmonické v najväčšom podielovom zastúpení. Sofistikované modely zát'aže tiež berú v úvahu frekvenčnú a teplotnú závislosť odoberaného výkonu na napájacom napätí či zát'ažení.

Ako najjednoduchšie modely zát'aže je možné si predstaviť kombinácie RLC prvkov v sériovom, či paralelnom zapojení. Zát'až je potom reprezentovaná pasívnym elementom v každej fáze s určitou veľkosťou impedancie a jej charakterom, a ďalej špecifickým chovaním podľa veľkosti napätia v mieste pripojenia. Z tohto dôvodu je potrebné presne a vo veľmi krátkom časovom intervale indikovať práve veľkosť napätia, ktoré je potom súčasťou modelu zát'aže.

4.1 Fyzikálne modely vs. black box modely

Model založený na základných technických znalosti fyzikálnych javov, ktoré ovplyvňujú systém sa nazýva fyzikálny model. Základný model založený podľa základných fyzikálnych zákonov bude poskytovať presné výsledky pri simulácii, ale v prípade ak bude systém veľmi zložitý, bude obtiažné získať presné výsledky, preto je nutné vytvoriť model založený na empirických zákonov. Ak je model založený na empirických vzťahoch medzi vstupnými a výstupnými signálmi, tak sa nazýva black box alebo empirický model. Black box modely sú aplikované v prípade, ak nie je dostatok znalostí k vytvoreniu presného fyzikálneho modelu, alebo ak fungovanie systému je veľmi zložitý, ale sú k dispozícii údaje pre vytvorenie matematických vzťahov medzi vstupnými a výstupnými meraniami systému. [25]

4.1.1 Údaje pre modelovanie zát'aže

Jeden zo základných prístupov pri získaní údajov o zát'aži je založený na báze meraní. Prístup je založený na priamom meraní v danej rozvodni a v napájaní pre stanovenie napätia a citlivosti frekvencie pre činný a jalový výkon. Údaje sa získavajú buď z meraní na pôvodnom mieste ktoré zahŕňa napätie, frekvenciu a činný a jalový výkon. Vložením nameraných dát do predpokladaného modelu získame identifikovaný model zát'aže. Takýto prístup modelovania modelov sa niekedy nazýva aj ako gray-box modelovanie, pretože je predpokladaná štruktúra modelu. Techniky použité pre stanovenie sa vzťahujú k zložitosti predpokladaného modelu.

Hlavnou výhodou použitia prístupu založeného na báze meraní je dostupnosť aktuálnych dát a možnosť sledovať sezónne zmeny, ale aj odchýlku od normálnej prevádzky. Na druhej strane, tento prístup znamená ekonomické investície do príslušného zariadenia na vykonávanie merania a sledovanie najdôležitejších zát'aží v systéme. [25]

4.2 Switching models (spínacie modely)

Simulačné modely, ktoré predstavujú zapínanie a vypínanie polovodičových spínačov sa bežne označujú ako spínacie modely. Tieto detailné počítačové simulácie sa používajú na pozorovanie prevádzky meniča v ustálenom a prechodnom stave. Na tieto simulácie komplexných obvodov sa používajú napríklad programy ako Saber alebo Matlab. Používanie spínacích modelov zahŕňa určité nevýhody medzi ktoré patrí: dlhý čas simulácie, chyby konvergenzie, veľké výpočtové zaťaženie [14].

4.3 Average models (priemerné modely)

Medzi výhody average modelov patria: zníženie času simulácie, schopnosti simulovať prechodné podmienky a schopnosť vykonávať analýzu malého signálu. Niektoré z funkcií ktoré sú spojené s analýzou signálu, zahŕňajú posúdenie stability a návrh regulátorov v uzavretej slučke. Average modely boli používané pre simuláciu napájacích DC systémov [14].

4.3.1 Average modelovanie

Modely spínacích obvodov sa rozdeľujú na dve kategórie:

- Priemerné modely
- Nelineárne prechodné spínanie modelov

Priemerné modelovanie znázorňuje činnosť spínacích obvodov cez lineárne techniky. Všetky lineárne obvody spadajú pod kategóriu priemerných modelov. Modely spínacích zdrojov obvykle pracujú na veľkých kmitočtoch a čas odozvy je v milisekundách. Doba tejto analýzy môže byť veľmi dlhá. Je prakticky nemožné zhodnotiť AC prenosovú funkciu zo simulovaného obvodu kôli vypínaču. Priemerné modely neobsahujú spínanie súčasťou. Tieto modely obsahujú jedinečnú stavovú rovnicu, ktorá popisuje chovanie priemerných modelov. Za účelom rozboru stability systému sa musí najprv vytvoriť priemerný model.

Prechodné modely reprezentujú spínacie obvody v časovej oblasti. Prechodné modely napodobujú omnoho viac pomaly, ako ich opak priemerné modely. Veľa charakteristických rysov, ako je otvorené slučkové zosilnenie, je omnoho ťažšie simulovať pri prechodných modeloch. Existuje veľa výhod pre použitie tohto typu modelovania. Model je veľmi presný, zobrazuje spínanie špičiek, oneskorenie, vlnenie a vzorkovanie.

Sú tu však nevýhody k nelineárnemu prístupu. Simulácie majú sklon trvať dlhšiu dobu. Existujú techniky, ktoré slúžia k urýchleniu simulácie.

Aby sme mohli realizovať AC analýzu obvodu, musíme obvod previesť na priemerný model s malou amplitúdou signálu. Priemerné modelovanie je presnejšie, veľmi rýchle a podporuje AC analýzy práve tak ako niektoré prechodné analýzy. Priemerné modely sú preto aj užitočné pre simuláciu, ako napríklad vstupná a výstupná impedancia a citlivosť.

Nevýhodou je, že v časovej oblasti je informácia vystavená zvlneniu, špičke a stratám, ktoré vznikajú pri spínaní. Celkové riešenie je v použití správneho modelu v závislosti na chovaní ktoré chceme skúmať. [15]

4.4 Statické modely zát'aže

Statické modely reprezentujú statickú zát'až, ktorá môže byť napríklad obyčajný odporový spotrebič, alebo aproximujú dynamickú zát'až, ktorú predstavuje napríklad indukčný motor. Pre statické modely bývajú vstupnými veličinami odoberaný činný a jalový výkon, ktoré odpovedajú veľkosti menovitého napätia a jeho frekvencie v mieste pripojenia.

Podľa chovania zát'aže pri zmene veľkosti napájacieho napätia sa modely zát'aže členia na základné tri druhy. Sú to modely s konštantnou impedanciou, konštantným odoberaným prúdom a konštantným odoberaným výkonom, sú známe aj pod skratkou ZIP, kde Z je označenie pre konštantnú impedanciu, I pre konštantný prúd a P pre konštantné výkony (PQ). Ich kombináciou či aproximáciou chovania vzniká potom ďalej model polynomický a exponenciálny.

Exponenciálny a polynomický model poskytuje dobrú náhradu zát'aže okolo menovitej hodnoty napätia. Presnosť exponenciálneho modelu klesá, pokiaľ napätie je omnoho väčšie ako menovité. U polynomickeho modelu klesá presnosť, pokiaľ je menovité napätie výrazne nižšie ako menovité. Niekedy sa u simulácií používa ich kombinácia pre daný interval napájacieho napätia. Základom je potom polynomický model, ktorý je zamenený za exponenciálny, pokiaľ sa zníži napájacie napätie pod určitú hranicu.

Existujú tiež ďalšie sofistikovanejšie statické modely zát'aže, ktoré v sebe zahrňujú ešte frekvenčné závislosti odoberaného výkonu, teplotnú závislosť apod. [16]

4.4.1 Zát'aže s konštantnou impedanciou

V tomto modeli sa odoberaný činný a jalový výkon mení s kvadrátom veľkosti napájacieho napätia $P = f(U^2)$, respektívne $Q = f(U^2)$. Nazýva sa niekedy tiež ako model s konštantnou admitanciou.

4.4.2 Zát'až s konštantným prúdom

Pri tomto modeli sa odoberaný výkon z daného uzlu mení priamo s veľkosťou napätia $P = f(U)$, respektívne $Q = f(U)$. U všetkých parametrov vo vzorcoch, kde sa vyskytujú výkony, musia byť zakomponované patričné závislosti zmeny napájacieho napätia.

4.4.3 Zát'až s konštantným výkonom

V tomto prípade veľkosť a charakter odoberaného výkonu nezávisí na veľkosti napájacieho napätia $P = \text{konšt.}$, respektívne $Q = \text{konšt.}$ Tento model sa najčastejšie využíva vo väčšine simulačných analýzach.

4.4.4 Exponenciálny model zát'aže

U tohto modelu je závislosť činného a jalového výkonu na veľkosti napájacieho napätia vyjadrená mocninou funkciou:

$$P = P_n \cdot \left(\frac{U_{nf}}{U_{ef}} \right)^a \quad (W; W, V, V) \quad (4.3)$$

$$Q = Q_n \cdot \left(\frac{U_{nf}}{U_{ef}} \right)^b \quad (VAr; VAr, V, V) \quad (4.4)$$

Kde hodnoty P_n , Q_n , U_{ef} sú menovité hodnoty zát'aže

Koeficienty a a b sú závislé na typu zát'aži a sú uvedené v tabuľke č.2.:

Tabuľka 2: Hodnoty koeficientov a , b pre rôzne typy zát'aží [26]

Hodnoty a , b	Typ modelu
0	konštantný výkon
1	konštantný prúd
2	konštantná impedancia

Podľa [26] sa najviac používajú koeficienty v rozsahu pre $a = 0.5 \sim 1.8$; $b = 1.5 \sim 6$. Ak by sa uvažovala odchýlka frekvencie, je možné použiť vzťah:

$$P = P_n \cdot \left(\frac{U_{nf}}{U_{ef}} \right)^a \cdot (1 + K_{pf} \cdot \Delta f) \quad (W; W, V, V, -, Hz) \quad (4.5)$$

$$Q = Q_n \cdot \left(\frac{U_{nf}}{U_{ef}} \right)^b \cdot (1 + K_{qf} \cdot \Delta f) \quad (VAr; VAr, V, V, -, Hz) \quad (4.6)$$

Kde K_{pf} a K_{qf} sú frekvenčnými koeficientami pre činný a jalový výkon, a Δf je odchýlka frekvencie.

4.5 Typy zát'aží

Kompozícia zát'aže v určitej oblasti je charakterizovaná údajmi o zát'aže, kompozíciou o každej jednej zát'aže a charakteristikami zát'aže. Údaje o zát'aži sú často zoskupené do priemyselných, bytových, občianskych a poľnohospodárskych údajov. Priemyselné zaťaženie je spojené predovšetkým priemyselnými procesmi a týmto procesom odpovedá 95 % zát'aží ako indukčné motory. Ťažký priemysel môže zahrňovať procesy pri premene elektrickej energie na teplo ako napríklad spájkovanie. Rezidenčné zaťaženie zahŕňa väčšinou zariadenia spojené s bývaním, ale tiež je tam určité percento elektrického kúrenia a klimatizácie v zime aj v lete. Medzi občianske zaťaženie sa zaraďuje verejné osvetlenie a pre poľnohospodárske zát'aže sú to asynchrónne motory.

4.5.1 Kompozícia zát'aží

Zloženie zát'aží je silno závislá na dennom čase, mesiaci a ročnom období, ale tiež na počasi. V najchladnejších krajinách je zima charakterizovaná vysokou zát'ažou hlavne elektrickým kúrením, zatiaľ čo v lete je zaťaženie minimálne. V teplejších krajinách je situácia opačná, pretože v lete je najväčšie zaťaženie spôsobené klimatizáciou. Zaťaženie elektrickým kúrením

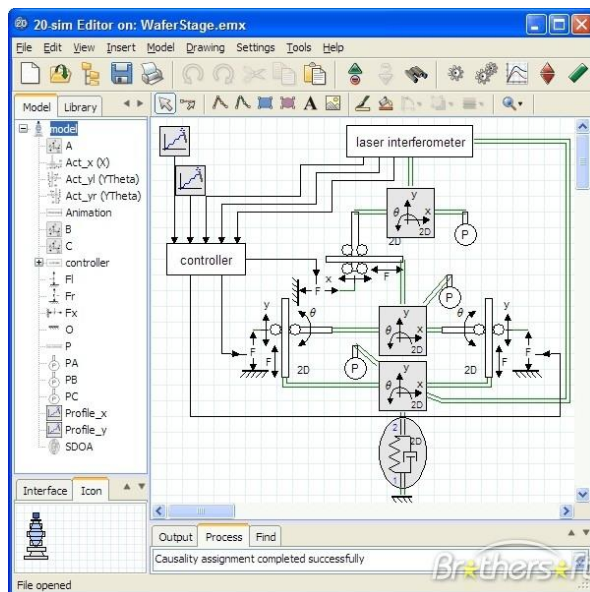
a klimatizáciou sa líši podľa ročného obdobia, ale tiež sú silno závislé na počasi. Ak je vonku chladno a fúka studený vietor tak dopyt po elektrickom kúrení bude vyšší, a v opačnom prípade počas leta bude zase zaťaženie klimatizáciou vyššie. [25]

5 MODELOVANIE A MOŽNOSTI POČÍTAČOVEJ SIMULÁCIE V ELEKTROENERGETIKE

V súčasnej dobe je veľa možností počítačovej simulácie v elektroenergetike. Požiadavky v tomto obore sú veľmi špecifické z dôvodu nutnosti často kombinovať mnoho jednotlivých technických disciplín. Hoci je takmer vždy treba riešiť elektrickú časť problému, väčšinou pristupujú ďalšie mechanické, hydromechanické, tepelné a ďalšie komponenty výsledného modelu. Z tohto dôvodu existuje v súčasnosti mnoho jednoduchých simulačných nástrojov, tak aj rovnako softwareové balíky s komplexnými schopnosťami čo do oborového záberu, tak zložitosti problému až po diferenciálne úlohy v časovej a priestorovej oblasti.

5.1 20-SIM, University of Twente

20-SIM je všeobecný modelovací a simulačný program. S týmto nástrojom sa dá modelovať a simulovať chovanie dynamických systémov, ako napríklad elektrických, mechanických, hydraulických a ich prípadné kombinácie. 20-SIM plno podporuje grafické modelovanie a umožňuje tiež konštrukciu a analýzu dynamických systémov intuitívnym a užívateľsky príjemným spôsobom. Je využívaná technológia konštrukčných celkov a komponentov, čo napomáha vytvárať model inžinierskym spôsobom výberom komponentov z knižnice a ich prepojenie do komplexného celku. Je teda možné vytvoriť model bez nutnosti zapisovať matematické diferenciálne vzťahy. Výsledky simulácie v 20-SIM môžu byť zobrazené ako animácie v 3D animačnom editore. Animácie sú vytvorené z knižnice preddefinovaných objektov obdobne ako napríklad v 3D Studiu firmy Autodesk. Zložitejšie grafické a konštrukčné objekty je možné importovať z CAD systémov. Animácie sa výsledky simulácie sú automaticky prepojené, čo ďalej prispieva k interaktívnemu charakteru 20-SIM. 20-SIM môže generovať ANSI-C kód a MATLAB kód pre ktorýkoľvek zo svojich modelov, rovnako je možné vytvárať C-kód pre MATLAB, prípadne S-funkcie nástroja SIMULINK. Ďalšou vlastnosťou 20-SIM je možnosť exportu modelu v C-kóde používanom programom firmy Syscon pre riešenie simulácií v reálnom čase v operačnom systéme Linux založenom na technológii RTAI.



Obrázok 19: Ukážka programu 20-SIM, prevzaté z [18]

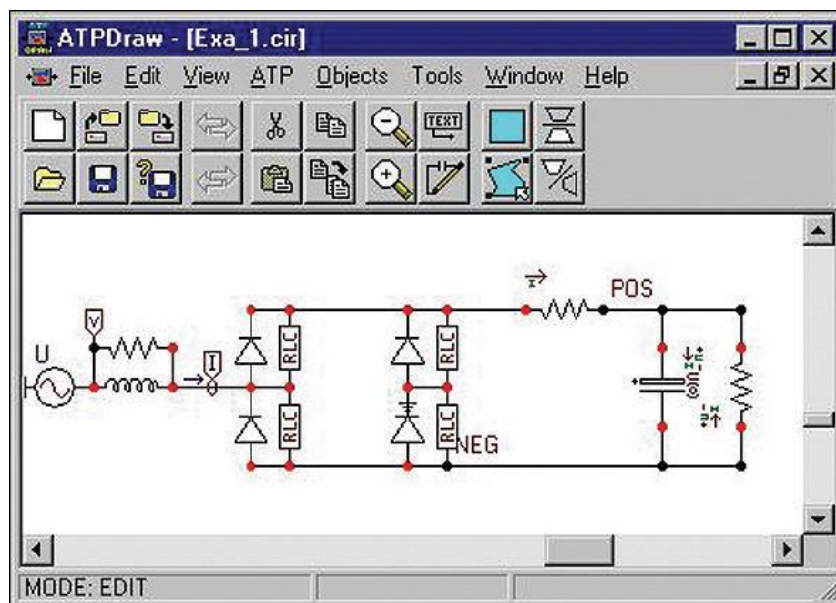
5.2 ATP-EMTP, EMTP-ATP Users Group

ATP-EMTP je univerzálny systém pre simuláciu prechodných dejov so zameraním na elektromagnetické a elektromechanické deje. Je možné riešiť aj komplikované a rozsiahle elektrické siete a radiacie systémy. ATP-EMTP má pokročilé modelovacie schopnosti a ďalšie vlastnosti, ktoré rozširujú jeho záber i mimo oblasť prechodných dejov.

Užívateľské rozhranie programových rozširujúcich modulov TACS (Transient Analysis of Control Systems) a MODELS umožňujú modelovanie nelineárnych radiacích systémov a komponentov siete ako sú napríklad: elektrický oblúk, korona a podobne. Jednoducho sa dá riešiť jak spínacie, tak aj poruchové deje. Výsledky výpočtov môžu byť podrobené frekvenčnej analýze.

Knižnica základných a rozšírených komponentov zahŕňa prakticky celú potrebnú škálu pre praktické elektroenergetické úlohy vrátane spínacích prvkov časovo a napäťovo závislých prvkov, polovodičových prvkov, trojfázového modelu alternátora, atď. U prvkov, kde to má zmysel je uvažovaný saturačný, prípadne hysterézný charakter.

Veľmi dôležitým rozšírením nástrojov pre ATP-EMTP je program ATP Draw, čo je grafické užívateľské rozhranie, ktoré vytvára interaktívnu nadstavbu nad pôvodne textovo orientovaný interface. Výsledný zdrojový kód pre výpočet je potom generovaný automaticky.

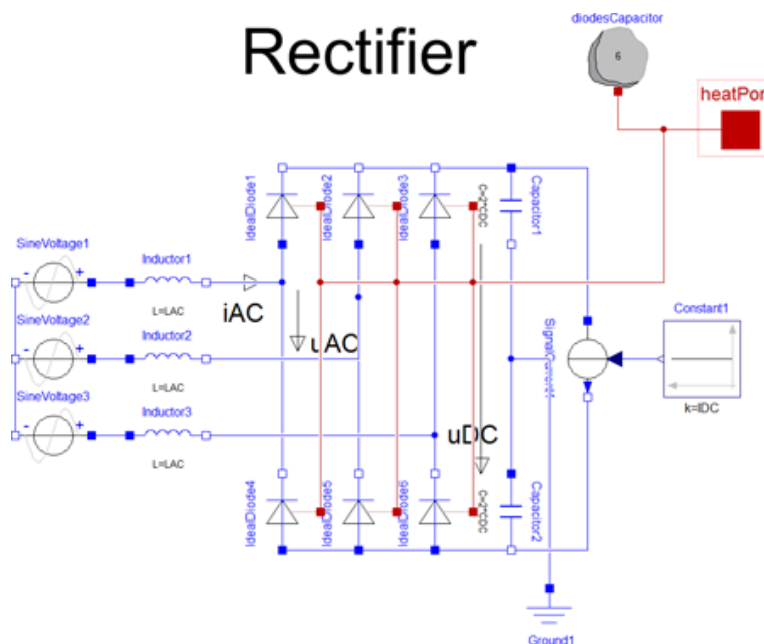


Obrázok 20: Ukážka programu ATP Draw, prebrané z [19]

5.3 Dymola – Dynamic Modeling Laboratory, Dynasim AB, Lund

DYMOLA bola vyvinutá novou technológiou pre úlohy z veľa inžinierskych oborov modelovania a simulácie s dôrazom na robotiku, letectvo, riadenie procesov a ďalších. DYMOLA umožňuje simuláciu dynamického chovania a komplikovaných vzťahov medzi systémami spadajúcich do rôznych oborov (mechanika, elektrotechnika, termodynamika, hydraulika, riadiace systémy), čo ju predurčuje aj ako účinný nástroj v obore energetiky.

Nová metóda modelovania vychádza z objektovej reprezentácie komponentov a matematických vzťahov, pričom väčšina rutinných manipulácií s objektami a teda aj s matematickými formuláciami je automatická. Objektový hierarchický prístup umožňuje jednoduché a prehľadné vytváranie komplikovaných a rozsiahlych systémov. So systémom je dodávaná knižnica modelových komponentov pre mnoho inžinierskych oborov a to vrátane elektroenergetiky.



Obrázok 21: Ukážka programu DYMOLA, prebrané z [20]

5.4 Dynast – Dynamic and Static problems, Icosym

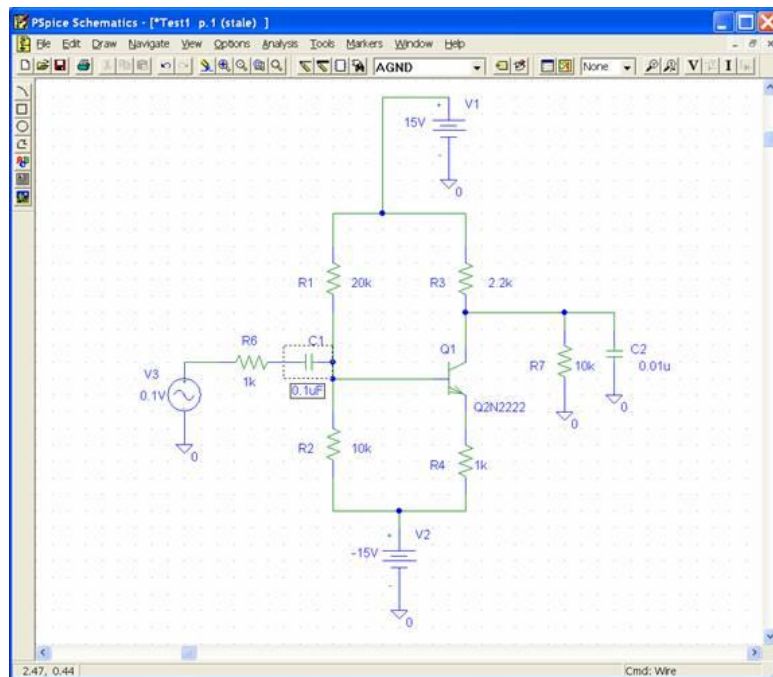
Tento simulačný systém vyvíjaný od konca sedemdesiatych rokov na ČVUT Praha reprezentuje modelovaný objekt pomocou kombinácie matematických algebrodiferenciálnych vzťahov, schéma radiacich blokov podobných ako v systéme SIMULINK a viacpólových fyzikálnych prvkov. To dáva kreativite užívateľa vysokú voľnosť v prístupe k problematike a vytvára podmienky pre využitie v mnoho oboroch.

Multipólové schémy, ktoré sú základnou technológiou modelovania, kopírujú principiálny charakter reálneho systému. Zostavenie modelu je teda možné bez pracného vyšetrenia diferenciálnych matematických vzťahov. Schémy týchto prvkov je možné pre zvýšenie prehľadnosti kombinovať do hierarchickej štruktúry a vytvárať ich knižnice. Viacpólové a blokové schémy je možné zostaviť nie len priamo v zdrojovom kóde jazyka programu, ale aj v interaktívnej nadstavbe DYNCAD alebo DYNShell. Okrem tohto je možné napríklad zložité elektrické schémy importovať do systému OrCAD. To umocňuje jednoduchosť užívateľskej obsluhy a produktivitu DYNASTu.

DYNAST je schopný nielen simulovať dynamické systémy, kde napríklad oproti SIMULINKu vyniká výkonnosťou, ale je schopný aj tieto systémy linearizovať a ďalej detailne analyzovať a získať napríklad prenosové funkcie, póly a nuly. Výsledky výpočtu je možné exportovať ako M-súbory do systému MATLAB.

5.6 The Spice

SPICE je všeobecný systém pre simuláciu elektrických obvodov, pre ich nelineárne jednosmernú, prechodnú a lineárnu striedavú analýzu. Obvody môžu pozostávať nie len z klasických elektronických prvkov, ale aj napríklad stratové vedenie, spínacích prvkov a polovodičových prvkov. Existuje veľa implementácií systému SPICE, z ktorých je najpopulárnejší komerčný PSPICE firmy OrCAD. OrCAD PSpice je pre svoju spoľahlivosť tradične v hojnom množstve používaný k presnej simulácii analógových a analógovo-digitálnych zariadení.

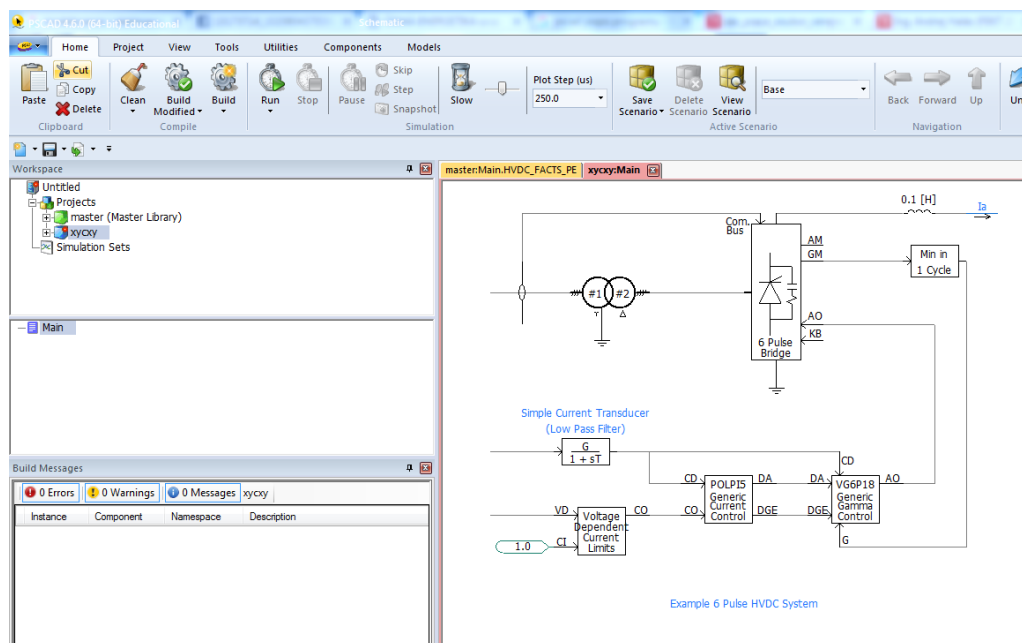


Obrázok 24: Ukážka programu PSpice, prebrané z [22]

5.7 PSCAD

Program PSCAD (Power System Computer Aided Design) je presný a rýchly simulátor elektrizačných sústav od kanadskej firmy Manitoba HVDC Research Centre. PSCAD umožňuje užívateľovi schematicky postaviť okruh, spustiť simuláciu, analyzovať výsledky a spracovať data v kompletne integrovanom grafickom prostredí. Online kreslenie funkcií, ovládacie prvky a meracie systémy sú zahrnuté, čo umožňuje užívateľovi meniť systémové parametre v priebehu simulácie, čím môže pozorovať efekty zatiaľ čo simulácia prebieha.

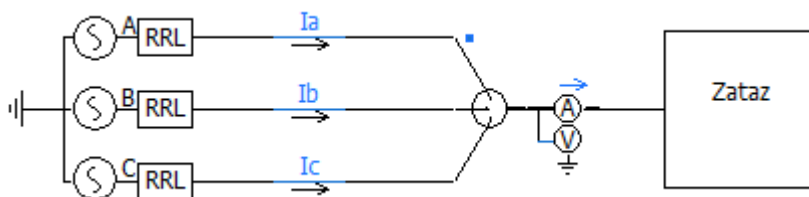
Program je určený pre návrh a analýzu všetkých typov elektrických sietí. PSCAD je známy tiež ako PSCAD/EMTDC, pretože základ výpočtového jadra programu tvorí práve EMTDC (Electromagnetic Transients including DC) – elektromagnetické prechodné javy vrátane jednosmerného prúdu, ktorý je neoddeliteľnou súčasťou graficko-užívateľského rozhrania PSCAD. Program je vhodný pre simuláciu ustálených stavov ako v elektrizačnej sústave, tak aj napríklad pri vyhodnocovaní riadiacich systémov. [23]



Obrázok 25: Ukážka programu PSCAD, zdroj vlastný

6 MODELÝ ZÁŤAŽÍ V PROGRAME PSCAD

V programe PSCAD bolo celkovo namodelovaných 6 modelov pre rôzne variácie zát'azí. Každý model je svojím spôsobom odlišný od ostatných modelov a teda je možné simulovať odlišné typy zát'azí. Modely boli namodelované samostatne z dôvodu prehľadnosti a rýchlosti výpočtu. Všetky modely zát'azí ktoré boli vytvorené v programe PSCAD majú rovnakú základnú hrubú schému ako je uvedené na obrázku č.26. Schéma sa skladá z trojfázového striedavého zdroja a modulu Zát'az v ktorom sa nachádzajú rôzne druhy modelov zát'azí ktoré budú popísané v tejto kapitole.



Obrázok 26: Hrubá schéma modelu zát'aze

6.1 Modely zát'azí so šesťpulzným usmerňovačom

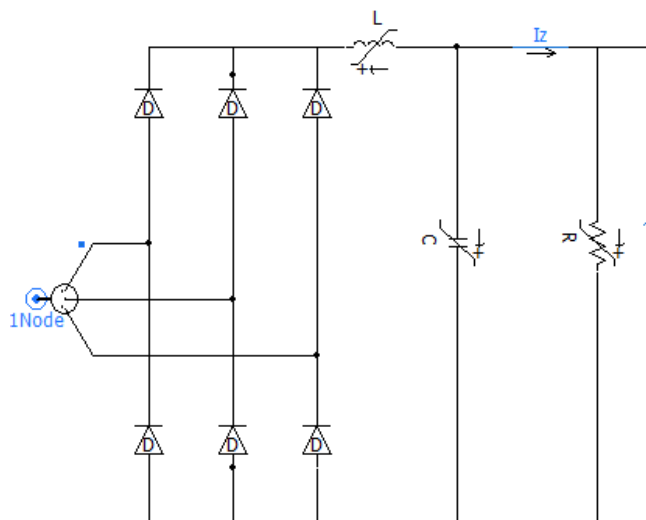
6.1.1 Jednosmerná odporová zát'az

Prvá časť zát'azí je v zložení trojfázový striedavý zdroj, šesťpulzný diódový usmerňovač, následne na usmerňovač je pripojený paralelný LC filter pre vyhladenie usmerneného napätia a prúdu, a odpor ktorý predstavuje zát'az. Odpor R sa spočíta ako:

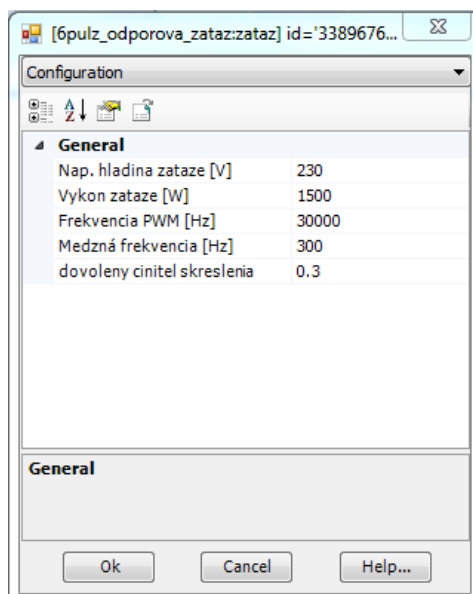
$$R = \frac{U_n^2}{P_n} \quad (\Omega; V, W) \quad (5.1)$$

Kde hodnoty U_n – menovité napätie zát'aze a P_n – výkon zát'aze, tieto hodnoty si volí užívateľ.

Model tejto jednosmernej odporovej zát'azi je zobrazený na obrázku č.27 a voľba parametrov ktorú si volí užívateľ je zobrazená na obrázku č.28.



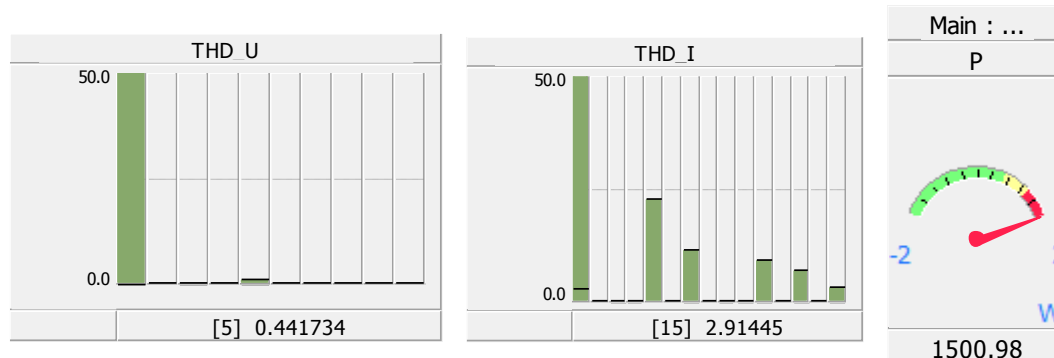
Obrázok 27: Jednosmerný model odporovej zát'aze



Obrázok 28: Voľba parametrov pre model odporovej zát'aže

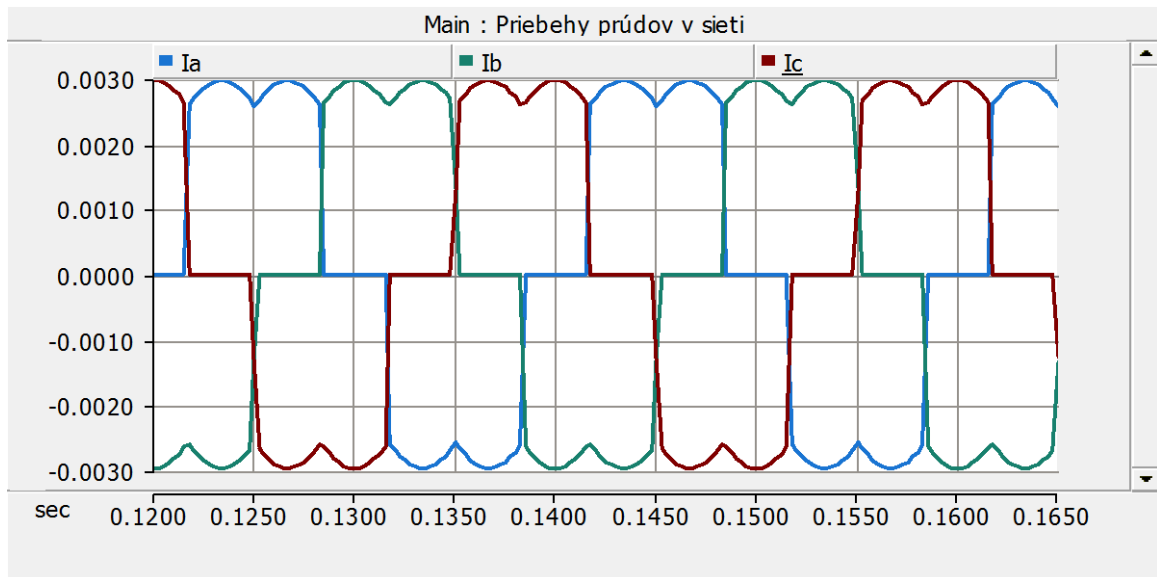
Ďalšie parametre ktoré si vyberá užívateľ sú potrebné pre návrh LC filtra, sú to parametre nosnej frekvencie PWM, medznej frekvencie a činiteľ dovoleného skreslenia prúdu, výpočet LC filtra je podľa [24].

Pri zadaných parametroch bola vykonané simulácia, pri ktorej odoberaný výkon zát'aže odpovedá zadanému, ďalej je možné pozorovať harmonické skreslenie prúdu a napätia v sieti ako reakciu na danú zát'až, simulácie je zobrazená na obrázku č. 29.



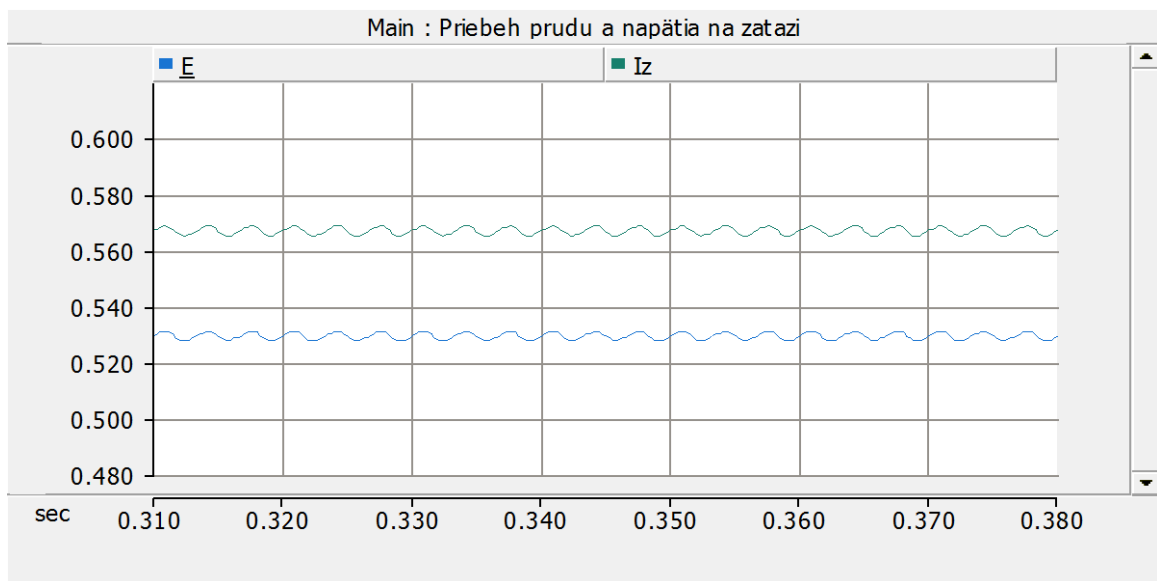
Obrázok 29: Harmonické skreslenie prúdu a napätie, výkon zát'aže

Z harmonického skreslenia prúdu je vidieť, že výrazné sú piata harmonická, siedma, jedenásta, trinásta a pätnásta. Ďalej je možné pozorovať priebehy prúdov v sieti, ktoré vstupujú do zát'aže, priebehy zobrazuje obrázok č.30.



Obrázok 30: Priebeh prúdov v elektrickej sieti pred vstupom do zát'aže

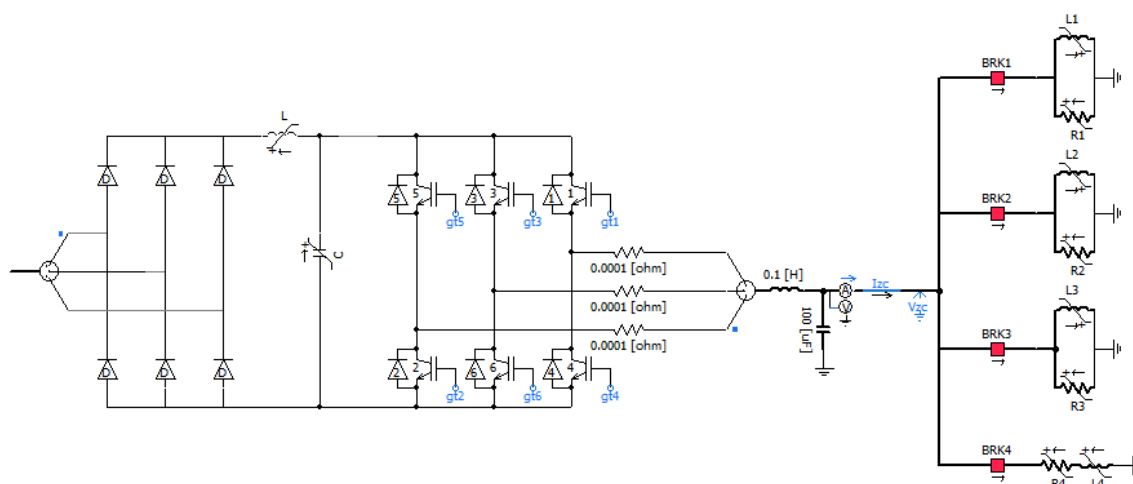
Tvar priebehu prúdu je spôsobený šesťpulzným usmerňovačom. Ďalej je možné pozorovať efektívne priebehy prúdu a napätia na zát'aži, priebehy sú zobrazené na obrázku č. 31.



Obrázok 31: Priebehy efektívneho prúdu a napätia na zát'aži

6.1.2 Striedavá zát'až so šesťpulzným usmerňovačom

Ďalší druh zát'aže je tvorený šesť pulzným neriadeným usmerňovačom, parametre diód neboli menené a diódy sú nastavené na defaultné hodnoty, ktoré udáva PSCAD, ďalej na usmerňovač je pripojený DC/AC striedač pre vytvorenie striedavého napätia. Na striedač sú pripojené tri paralelné RL zát'aže a jedna sériová RL zát'až, je to z toho dôvodu aby si užívateľ mohol nasimulovať rôzne kombinácie zát'aží ako napríklad zát'až s konštantným prúdom, výkonom alebo impedanciou. Pred každou zát'ažou sú pripojené vypínače, je to z toho dôvodu, aby si užívateľ mohol sám zvoliť koľko zát'aží chce mať súčasne pripojených, celý obvod je zobrazený na obrázku č.32.



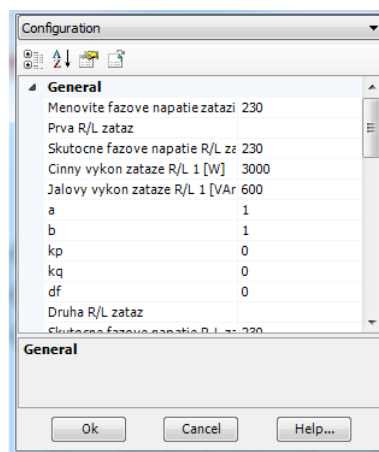
Obrázok 32: Zapojenie striedavej zát'aže RL

Jednotlivé vypínače sú ovládané pomocou kontrol panelu ktorý je zobrazený na obrázku č. 33.

Main : Vypinace			
BRK1	BRK2	BRK3	BRK4
otevr. zavr.	otevr. zavr.	otevr. zavr.	otevr. zavr.
0	0	0	0

Obrázok 33: Kontrol panel pre pripájanie a odpájanie zát'aží

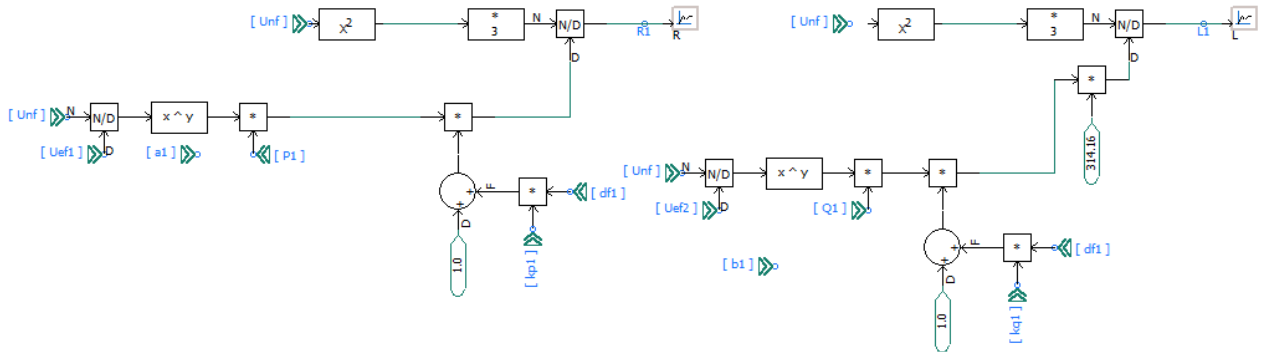
Užívateľ si rovnako navolí parametre pre zát'aže ako v predchádzajúcom prípade:



Obrázok 34: Voľba parametrov pre striedavú zát'až

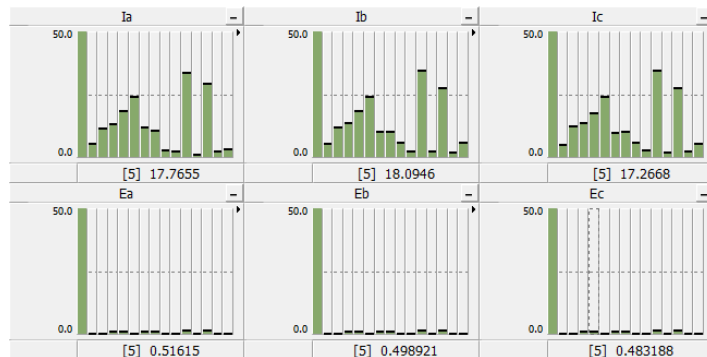
Kde označenie R-L platí pre sériovú zát'až a označenie R/L pre paralelnú zát'až. Koeficienty a, b, k_p a k_q sú popísané v kapitole 4.4.4.

Výpočet parametrov zát'aže je podľa vzťahov 4.5 a 4.6 a zobrazenie rovníc v PSCADE je zobrazené na obrázku č.35.

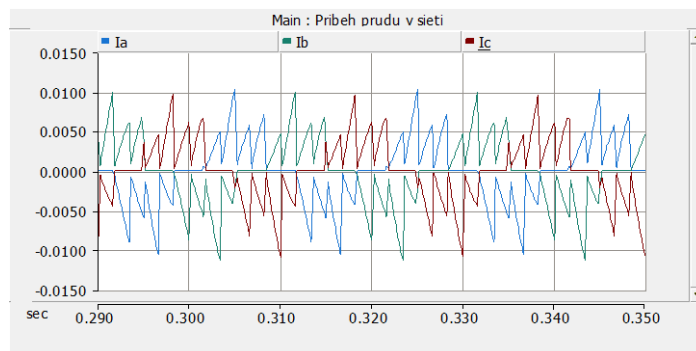


Obrázok 35: Výpočet parametrov zát'aže

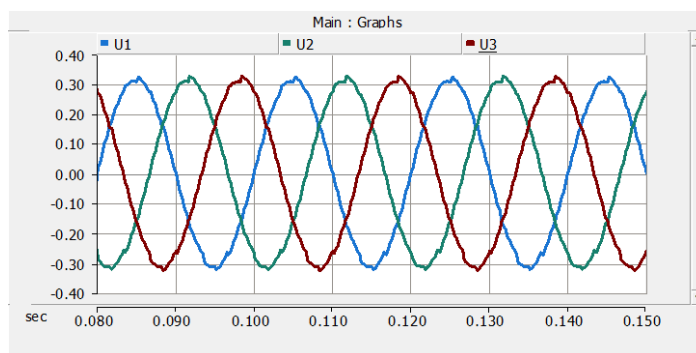
Po spustení simulácie môžeme pozorovať aká je interakcia medzi sieťou a zát'ažou. Nastavené parametre zdroja boli 400 V a zát'až bola tiež na napät'ovej hladine NN, všetky zát'aže boli pripojené, ako vidieť z obrázku č.36 ktorý zobrazuje harmonické skreslenie napätí a prúdu vo všetkých fázach siete, okrem prvej harmonickkej, sú najvýraznejšie piata harmonická, jedenásta a trinásta harmonická. Všetky harmonické sú takmer rovnaké, líšia sa veľmi mierne. Piata harmonická vo fáze A je 17.764 %, vo fáze B 18.085 % a vo fáze C 17.266 %. Ďalej je možné pozorovať priebeh prúdu vo všetkých troch fázach v sieti, priebeh je zobrazený na obrázku č.37.



Obrázok 36: Harmonické skreslenie prúdu a napätia v elektrickej sieti

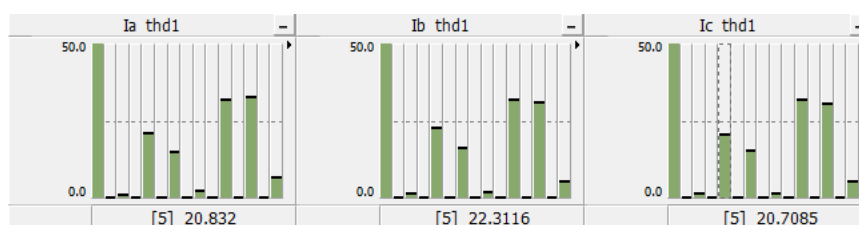


Obrázok 37: Priebeh prúdov v elektrickej sieti



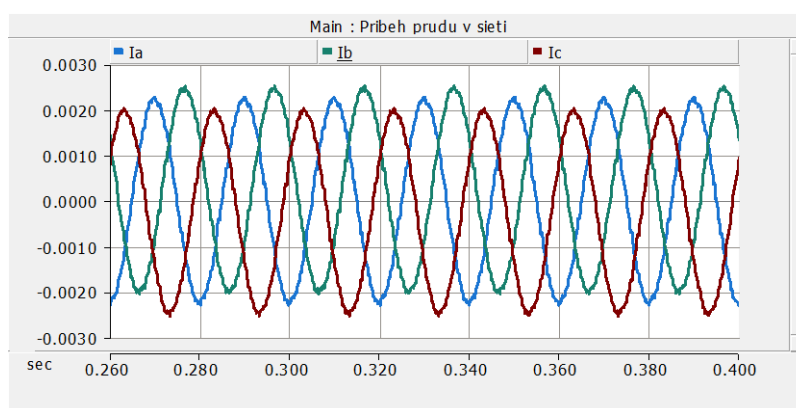
Obrázok 38: Priebek napätí v elektrickej sieti

Pri rovnakej simulácii, ale pri nastavení zdroja na VN 22 kV a vložení transformátoru medzi zdroj a zát'až priebehy prúdu a harmonické skreslenie prúdu v sieti zmení, zmeny je možné pozorovať na obrázku č.39 a č.40.



Obrázok 39: Harmonické skreslenie prúdu v sieti pri 22 kV

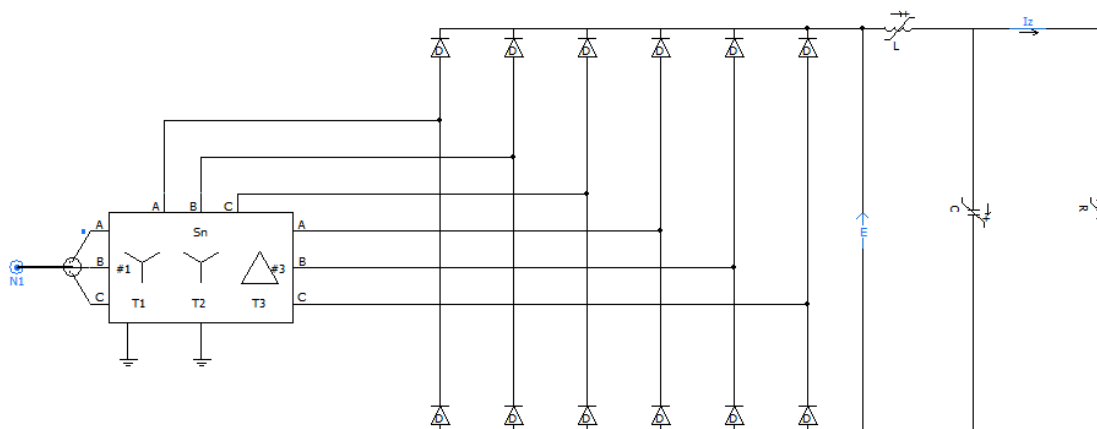
Oproti obrázku č.36 je harmonické skreslenie na obrázku č.39 priaznivejšie a to vďaka pripojenému transformátoru v zapojení hviezda/trojuholník, ďalej sa to priaznivo prejaví aj na priebehoch prúdu v elektrickej sieti:



Obrázok 40: Priebek prúdu v sieti 22 kV

6.1.3 Zát'až s dvanást'pulzným usmerňovačom

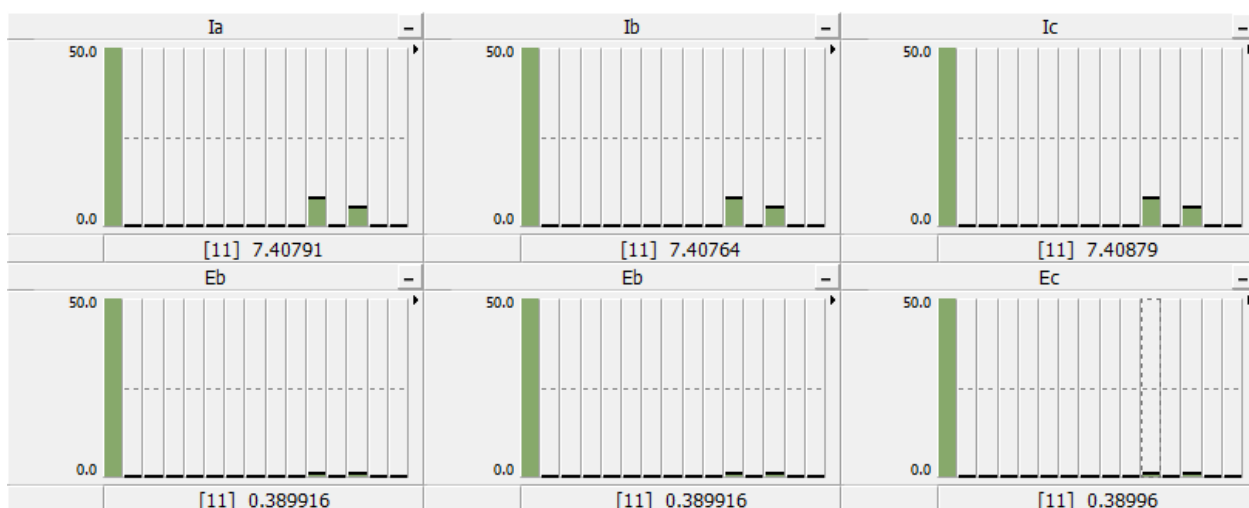
Najjednoduchšia variácia zobrazenia zát'aže je jednosmerná odporová zát'až ktorá je zobrazená



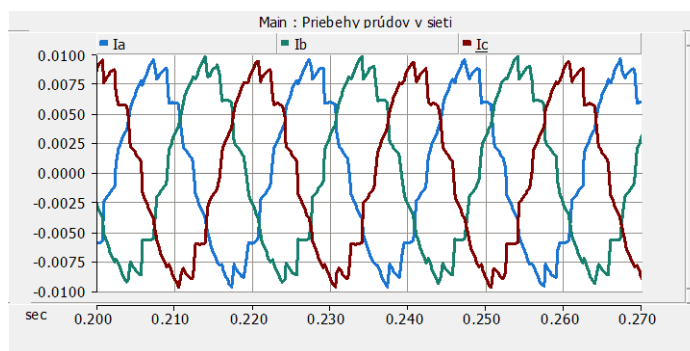
Obrázok 41: Zapojenie odporovej zát'aže s dvanást'pulzným usmerňovačom

V tomto prípade je usmerňovač napájaný cez trojvinut'ový transformátor, užívateľ si bude môcť zvoliť parametre transformátora ako: Menovité zaťaženie S_n , napätie primárneho vinutia, sekundárneho a terciárneho, možnosti zapojenia jednotlivých vinutí. Rovnako je možné si zvoliť parametre zát'aže ako odoberaný výkon a napäťovú hladinu na ktorej sa zát'až nachádza.

Pri rovnakej simulácii ako pri zapojení cez šesť pulzný usmerňovač je možné pozorovať rozdielne priebehy ktoré sú zobrazené na obrázku č.41 a č.42. Pri dvanást'pulznom usmerňovači je harmonické skreslenie menšie ako pri šesťpulznom, čo bude pravdepodobne spôsobené dvanást'pulzným usmerňovačom.



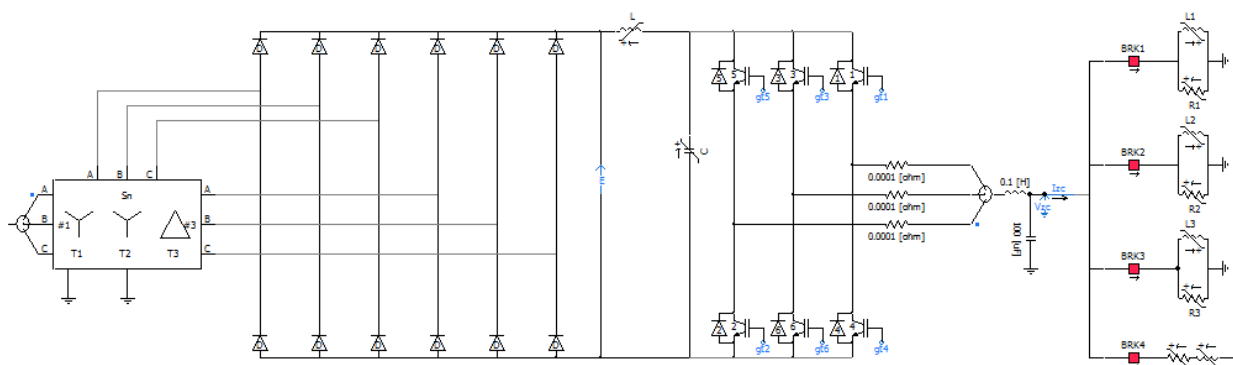
Obrázok 42: Harmonické skreslenie prúdu a napätia vo všetkých fázach



Obrázok 43: Priebeh prúdu v elektrickej sieti vo všetkých fázach

6.1.3.1 Striedavá zát'až s dvanásťpulzným usmerňovačom

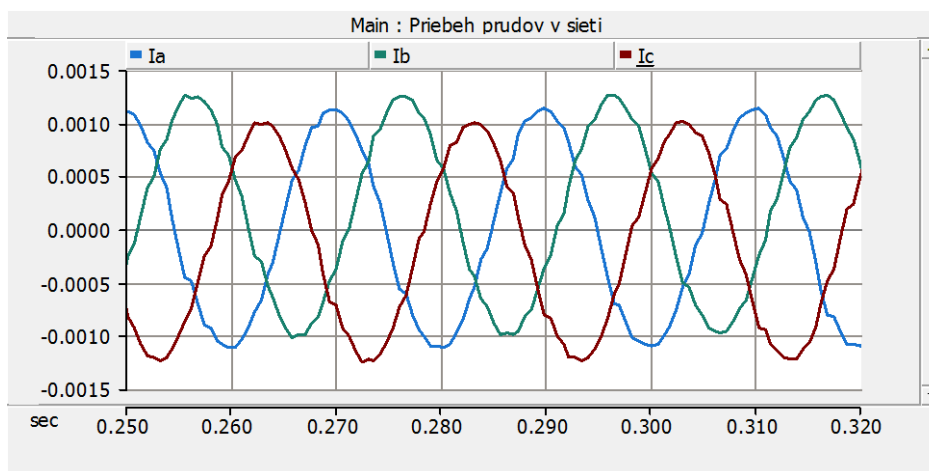
Zapojenie striedavej zát'aže je obdobné ako v predošlom prípade so šesťpulzným usmerňovačom



Obrázok 44: zapojenie striedavej zát'aže so dvanásť-pulzným usmerňovačom

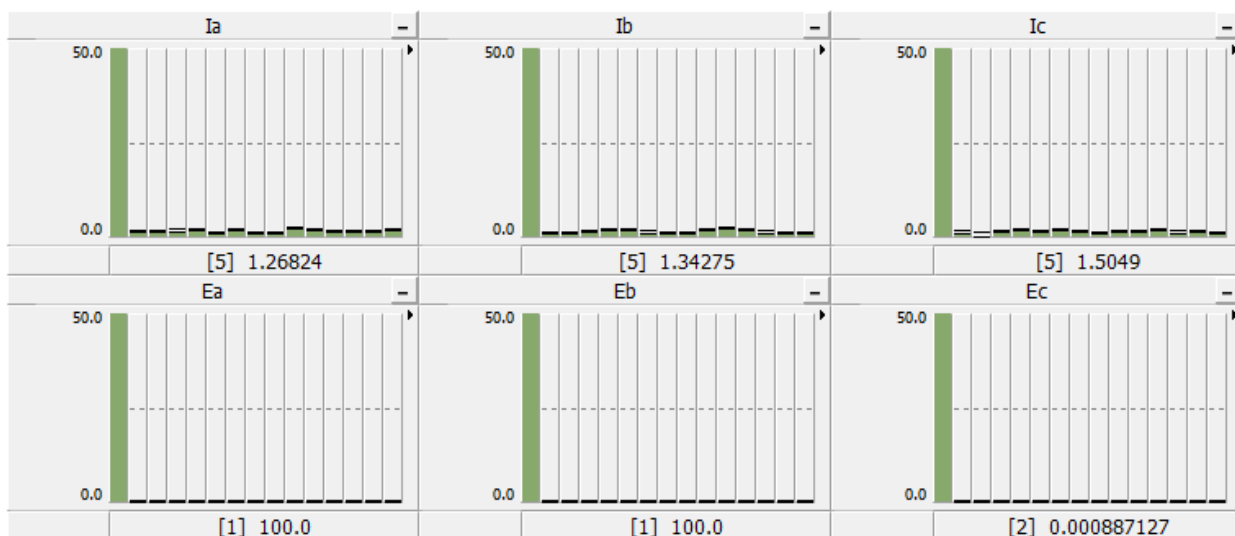
Variácie zát'aží v prípade s dvanásťpulznom sú spravené štyri, obdobne ako v predošlom prípade. Užívateľ si takto pri rôznych možnostiach a druhoch zát'aží môže niektoré vybrať a porovnať ich medzi sebou.

Na obrázku č.45 je zobrazený priebeh prúdov v elektrickej sieti vstupujúcich do transformátora, z obrázku je vidieť, že priebeh je takmer sínusové charakteru s miernym skreslením.



Obrázok 45: Priebeh prúdu v elektrickej sieti

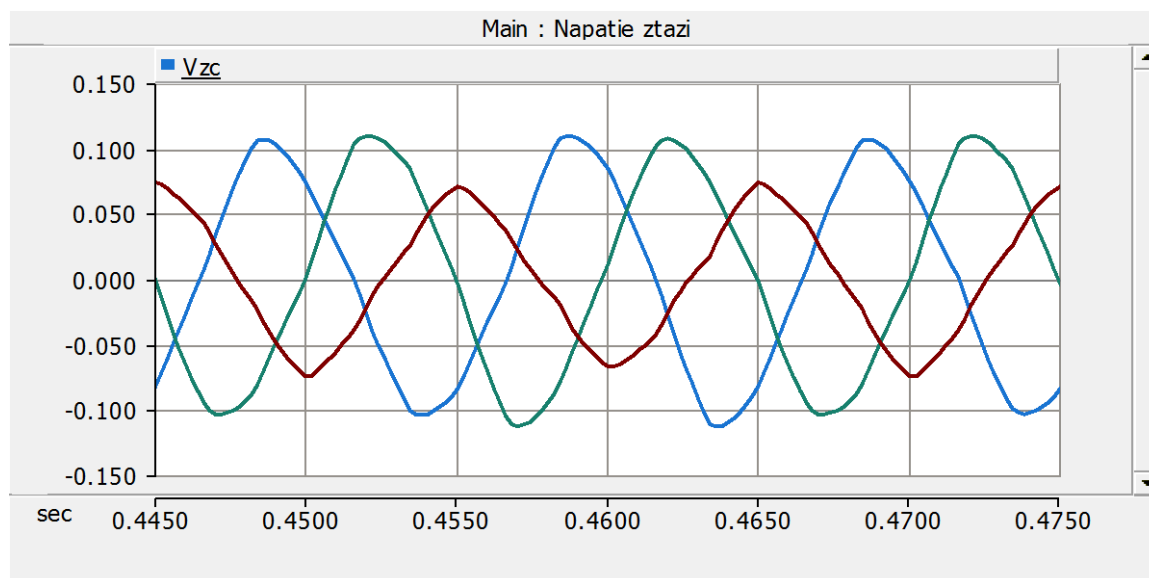
Ďalej je na *obrázku č.46* zobrazené harmonické skreslenie prúdu a napätia v sieti. Oproti šesťpulznom usmerňovaču nie je žiadna harmonická výrazne väčšia. Je teda možné povedať, že dvanásťpulzný usmerňovač ma pozitívny vplyv na kvalitu elektrickej energie.



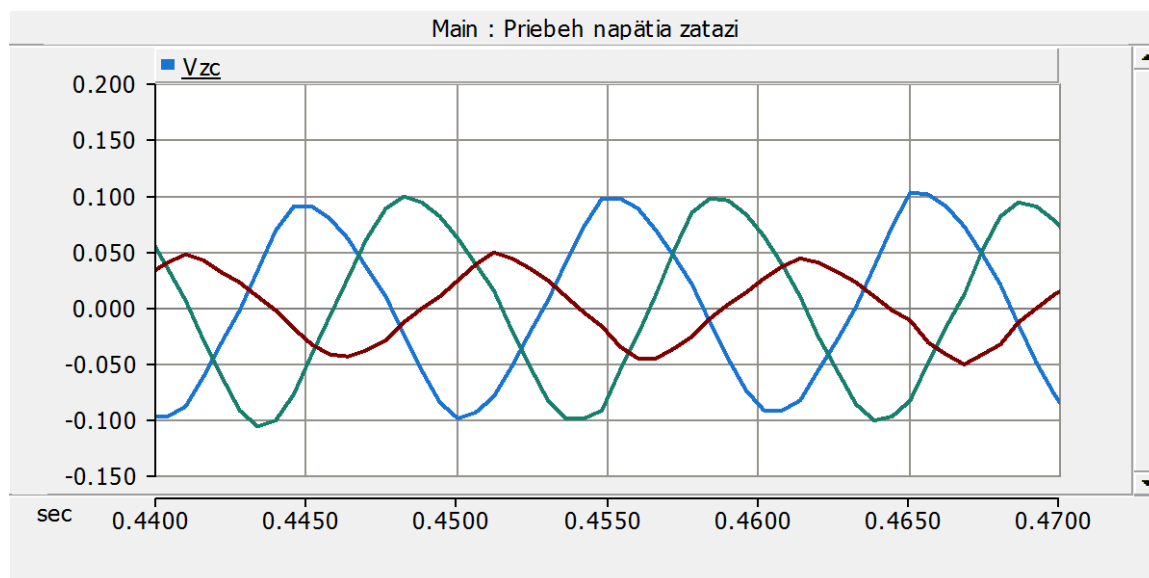
Obrázok 46: Harmonické skreslenie napätia a prúdu v sieti

6.2 Modely pre nesymetriu

Boli vytvorené dva modely pre simuláciu nesymetrie, ktorá by sa umelo vytvorila tým, že by užívateľ nesúmerne zaťažil jednu fázu, teda pri zadávaní hodnôt napätí by sa jedna fáza odlišovala od ostatných dvoch. Modely boli vytvorené so šesť pulzným a dvanásť pulzným usmerňovačom. Modely sú totožné s ostatnými, preto nebudú v tejto kapitole opakovane uvádzané. Pri simulácii s nesúmerným zaťažením fáze na napät'ovej hladine NN je len možné pozorovať nesúmerný priebeh napätia zát'aží, ktorý je vidieť na *obrázkoch 47 a 48*.

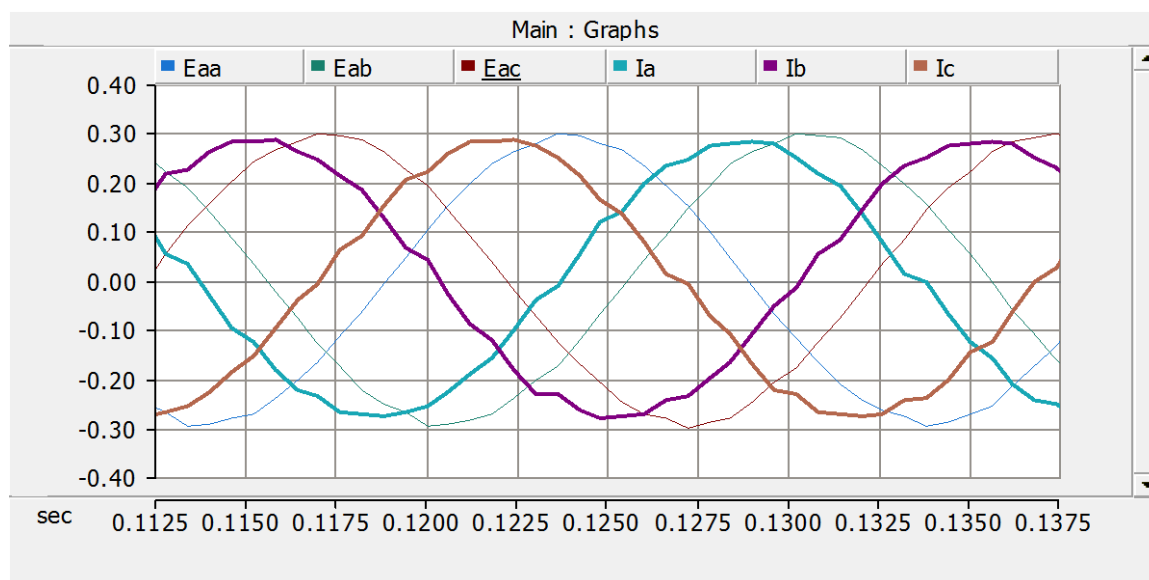


Obrázok 47: Priebeh napätia pri šesť pulznom usmerňovači



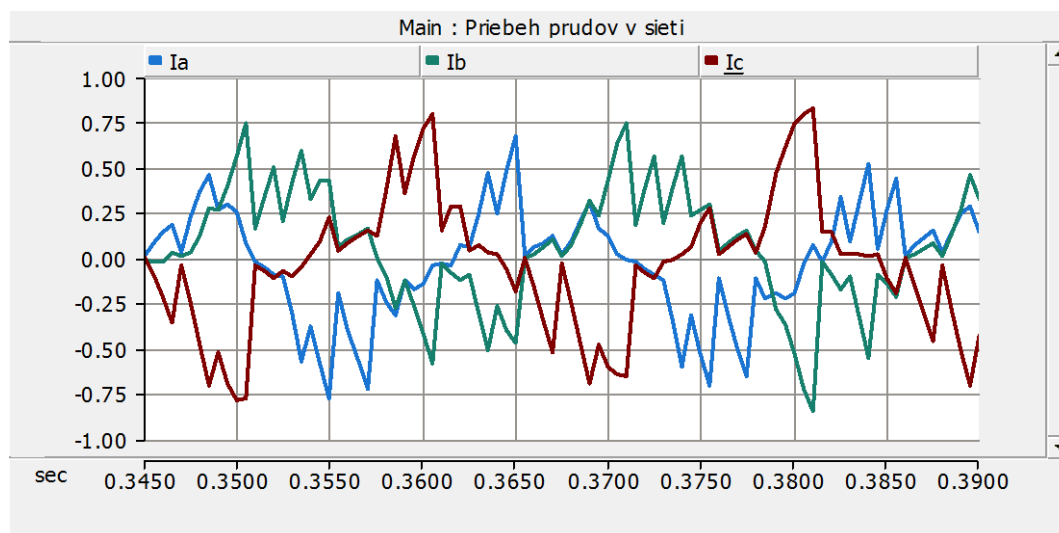
Obrázok 48: Priebeh napätia pri dvanásť pulznom usmerňovači

Nesymetriu je možné pozorovať len na samostatnej zát'aži, ale v sieti sa pri simulácii neprejavila, je to možné pozorovať z obrázku č.49. kde zvýraznené čiary patria priebehu prúdu.



Obrázok 49: Priebeh napätia a prúdu pri nesymetrii

Pokiaľ sa jedná o elektrickú sieť VVN 110 kV, ktorá napája zát'až na VN – 22 kV tak je možné pozorovať deformáciu prúdu v sieti a aj nerovnomerné harmonické skreslenie, konkrétna simulácia bola nasimulovaná na modely zát'aže s dvanásť pulzným usmerňovačom. Priebeh simulácie je možné pozorovať na obrázku č.50. Keď sa porovnajú obrázky č.49, č.50 a zameriame sa na priebeh prúdu pri uvažovaní nesymetrického zaťaženia zát'aže, tak je možné vidieť značný rozdiel, aj keď sa jedná o rozdielne napäťové hladiny.



Obrázok 50: Deformácia prúdu pri nesymetrii

7 ZÁVER

Cieľom diplomovej práce bolo namodelovať model záťaže v programe PSCAD. Diplomová práca je rozdelená na päť hlavných kapitol. V prvej a druhej kapitole je popísaná problematika ohľadne kvality elektrickej energie, ako napríklad harmonické skreslenie, nesymetria a podobne. Tieto dve kapitoly slúžia ako teoretický úvod. Tretia kapitola sa venuje problematike modelovania záťaže. Boli popísané rôzne druhy modelov a druhy záťaže. Celkovo sú tri druhy záťaže ktoré sa označujú pod skratkou ZIP – model s konštantnou impedanciou, prúdom a výkonom, týmto trom modelom som sa venoval aj v diplomovej práci.

Štvrtá kapitola popisuje rôzne druhy programov, ktoré sa používajú v elektroenergetike na modelovanie alebo simuláciu požadovaných vecí. Celkovo bolo opísaných sedem rôznych programov, boli popísané ich výhody a nevýhody, kapitola je zakončená popisom programu PSCAD na ktorý nadväzuje praktická časť. Posledná piata kapitola sa venuje samostatnému modelovaniu záťaže. Celkovo bolo namodelovaných šesť modelov. Jedna polovica je ako záťaž so šesťpulzným usmerňovačom a druhá polovica je záťaž s dvanásťpulzným usmerňovačom. Pri každej simulácii si sám užívateľ zvolí parametre záťaže ktoré sú známe a daný typ siete, napríklad sieť s ideálnym zdrojom. V oboch prípadoch je namodelovaný model s jednosmernou záťažou a striedavou záťažou. Ako jednosmerná záťaž bol použitý premenlivý odpor. V prípade striedavej záťaže je možné simulovať viac druhov zaťaženií – ZIP modely. Takto si užívateľ môže nasimulovať rôzne variácie, dané záťaže je možné odpájať, prípadne pripájať aj počas simulácie a je možné pozorovať chovanie siete pri zmenách zaťaženií alebo pri rozdielnych záťažiach.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1].Electrical load. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_load
- [2].Electrical Load Classification and Types – Part Two. *Electrical-knowhow* [online]. 2013 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.electrical-knowhow.com/2012/03/electrical-load-classification-and.html>
- [3].Electrical Load Classification and Types – Part Two. *Electrical-knowhow* [online]. 2013 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://www.electrical-knowhow.com/2012/03/electrical-load-classification-and_06.html
- [4].Kvalita dodávky elektrické energie. *Home.pilsfree* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <https://home.pilsfree.net/fantom/FEL/MR/MR-kvalitaE-flickr.pdf>
- [5].VÝVODA, Marek. Kvalita elektrické energie v distribučních sítích nn. *Bakalárska práca* [online]. 2008, **2008**, 68 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=16890
- [6].Kvalita elektrické energie - průvodce [online]. (5.2.3), 11 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://copperalliance.eu/docs/librariesprovider3/kvalita-elektrick%C3%A9-energie5-2-3-pdf.pdf?Status=Master&sfvrsn=0>
- [7].Kvalita elektrické energie-průvodce. *Kvalita elektrické energie-průvodce* [online]. (5.1.3) [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://copperalliance.eu/docs/librariesprovider3/kvalita-elektrick%C3%A9-energie5-1-3-pdf.pdf?Status=Master&sfvrsn=0>
- [8].PNE 33 3430-3 Parametry kvality elektrické energie – Část 3: Nesymetrie a změny kmitočtu napětí
- [9].Kvalita elektrické energie - průvodce. *Harmonické Harmonické Příčiny a účinky* [online]. (3.1), 15 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://copperalliance.eu/docs/librariesprovider3/kvalita-elektrick%C3%A9-energie3-1-pdf.pdf?Status=Master&sfvrsn=0>
- [10]. DRÁPELA, Jiří. *ZPĚTNÉ RUŠIVÉ VLIVY OSVĚTLOVACÍCH SOUSTAV NA NAPÁJECÍ SÍŤ* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/80-214-3352-6.pdf>. Vysoké učení technické v Brně.
- [11]. ČSN EN 50160, Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě

- [12]. MPQ1 přednášky. *Vutbr* [online]. 2013 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/elearning/course/view.php?id=149864>
- [13]. Lighting systems: Light sources in modern buildings: characterization, modeling and simulations. *IEEE PES* [online]. , 31 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.ieee-pes.org/presentations/gm2014/PESGM2014P-002738.pdf>
- [14]. *MODELING OF MULTI-PULSE TRANSFORMER RECTIFIER UNITS IN POWER DISTRIBUTION SYSTEMS* [online]. Blacksburg, Virginia, 2003 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://ocsimize.fr/download/download_doc/multiphysique/multipulse_transformer_in_power_systems.pdf
- [15]. STEVEN M. SANDLER, *SMPS SIMULATION WITH SPICE 3*, USA, 187 s., ISBN 0-07-913227-8
- [16]. Statické modely zátěže a jejich modelování v netradičním softwaru pro elektroenergetiku. *Electroscope* [online]. 2015, **2015**(1), 7 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://ek702p10-ket.fel.zcu.cz/images/PDF/Rocnik2015/Cislo1_2015/r9c1c3.pdf
- [17]. *Dynamic Load Models for Power Systems - Estimation of Time-Varying Parameters During Normal Operation* [online]. 2002 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <https://lup.lub.lu.se/search/publication/587901>
- [18]. 20sim-89503-1233638710.jpeg. *Brother soft* [online]. 2014 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://img.brothersoft.com/screenshots/softimage/0/20sim-89503-1233638710.jpeg>
- [19]. Přehled současných možností počítačové simulace v elektroenergetice. *Ceskaenergetika* [online]. 2008 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://www.ceskaenergetika.cz/nezarazene_clanky/prehled_soucasnych_moznosti_pocitacove_simulace.html
- [20]. Rectifier. *Claytex* [online]. 2016 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.claytex.com/wp-content/uploads/2011/04/Rectifier.png>
- [21]. Multisim. *Screenshot* [online]. 2016 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://screenshot.it.sftcdn.net/it/scrn/80000/80781/ni-multisim-20.jpg>
- [22]. Pspice. *Http://www.ee.nmt.edu/* [online]. 2016 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://www.ee.nmt.edu/~rison/ee321_fall02/Tutorial_files/image006.jpg
- [23]. TOMŠŮ, Vojtěch. *MODEL SÍŤE VVN V PROGRAMU PSCAD* [online]. Brno, 2015 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=101692

- [24]. PATOČKA, Miroslav. *Vybrané staře z výkonovej elektroniky II* [online]. 2005, , 109 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=34773
- [25]. ROMERO NAVARRO, Inés. *Dynamic Load Models for Power Systems: Estimation of Time-Varying Parameters During Normal Operation*[online]. SWEDEN, 2002 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=587901&fileId=587902>. Lund University.
- [26]. Power System Operations & Planning 3 –Load Modeling. *Http://web.eecs.utk.edu/* [online]. 2015 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://web.eecs.utk.edu/~kaisun/ECE422/ECE422_3-LoadModeling.pdf